



**Soraia Filipa Amaral Machado**

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

# **INFLUÊNCIA DE AGREGADOS PROVENIENTES DE RCD E CINZAS VOLANTES NÃO-CONFORMES NO DESEMPENHO DE ARGAMASSAS DE CIMENTO**

Dissertação para obtenção do Grau Mestre em  
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Fernando Farinha da Silva Pinho, Professor Auxiliar, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor António Manuel Pinho Ramos

Arguente: Prof.<sup>a</sup> Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues

Vogal: Prof. Doutor Fernando Farinha da Silva Pinho



**FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

**Julho 2014**



‘Copyright’ Soraia Filipa Amaral Machado, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar o meu profundo agradecimentos a todas as pessoas que estiveram presentes e contribuíram de alguma forma para a conclusão desta etapa da minha vida.

Ao meu orientador científico, Professor Doutor Fernando Pinho, pela disponibilidade, apoio, incentivo, orientação e confiança transmitidas durante a execução deste trabalho.

À empresa Sociedade Gestora de Resíduos, SA, em nome do Engenheiro Rui Barros, pelo fornecimento do agregado fino reciclado e normalizado, e à Central Termoeléctrica do Pego, em nome do Engenheiro Jorge Henriques, pelo fornecimento das cinzas volantes, e a ambos pela disponibilização de algum material bibliográfico.

À professora Margarida Rolim, do Departamento de Ciências dos Materiais, pela realização das análises FRX aos agregados reciclados.

Ao Engenheiro Vítor Silva, pela disponibilidade sempre demonstrada, pelo apoio e incentivos, e todos os ensinamentos e conhecimento partilhados.

Às melhores companheiras, amigas de uma vida académica e pessoal, Raquel Frutuoso e Inês Oliveira, sem as quais os últimos 5 anos não seriam os mesmos. Obrigada por todos os momentos bons e menos bons, de cansaço e descanso, de estudo e muita diversão, mas sobretudo obrigada pelo apoio, ajuda e a amizade incondicional sempre demonstrada.

A todos os colegas de curso e amigos que constituíram uma ajuda fundamental ao longo do meu percurso académico, que partilharam noites de estudo e trabalho como também convívio e diversão, destacando André Moreno, Ricardo Ramos, Gonçalo Lopes, Nuno Vieira, Diogo Brito e em especial os amigos de longa data, Guilherme Martins e Diogo Alinho.

Agradeço a quem impulsionou a minha entrada na faculdade, pela grande ajuda nos primeiros passos da vida académica e como também por todos os bons momentos partilhados.

Por fim, e mais importante, um enorme agradecimento a quem possibilitou este percurso, aos meus pais, padrinhos, irmão e especialmente à minha prima/irmã Tânia Delgado, por todo o apoio, carinho e compressão transmitidos ao longo da minha vida.



# RESUMO

A indústria da construção civil, responsável por um elevado consumo de recursos naturais, sempre se fez acompanhar de processos construtivos que originam quantidades significativas de resíduos, nomeadamente resíduos de construção e demolição (RCD).

Por outro lado, as centrais termoelétricas, responsáveis pela produção de energia elétrica através da queima de carvão, produzem volumes significativos de resíduos industriais designados por cinzas volantes (conformes e não-conformes).

Os RCD e as cinzas volantes não conformes - com alto teor de carbono e como tal não comercializadas -, têm como destino final o aterro, conduzindo a um impacto ambiental e problemas ecológicos.

Tanto as cinzas volantes (por possuírem propriedades pozolânicas) como os agregados reciclados provenientes de RCD, apresentam grande potencial de reutilização. Assim, o aproveitamento destes resíduos é uma alternativa viável ao uso de “materiais tradicionais” promovendo o desenvolvimento de uma construção sustentável.

A presente dissertação tem como objetivo o estudo da incorporação conjunta destes resíduos em argamassas, avaliando-se assim uma alternativa ao aterro. Para tal, na parte experimental do trabalho, produziram-se 10 diferentes argamassas de cimento com agregado fino normalizado, agregado fino reciclado e uma combinação entre os dois tipos de agregados. Para efeitos de comparação, duas das argamassas produzidas são consideradas argamassas de referência (sem substituição do ligante); nas restantes argamassas procedeu-se à substituição de 1/6 do volume de cimento por cinzas volantes conformes e não conformes. Todas as argamassas foram produzidas ao traço volumétrico 1:3 (ligante: agregado) com 100 e 50 % de substituição em massa de agregado normalizado por agregado reciclado; as argamassas com substituição do ligante por cinzas volantes ao traço volumétrico 1:0,2:3,6 (ligante: cinzas: agregado). Aos 28 dias de cura avaliou-se o seu comportamento físico e mecânico.

A incorporação de agregados reciclados e cinzas volantes na produção das novas argamassas, conduziu, entre outros aspetos, ao aumento da porosidade aberta e consequente diminuição da resistência mecânica, em relação às argamassas de referência. No entanto, tendo em consideração a reutilização de resíduos para produção de argamassas, os resultados mostraram-se globalmente positivos para certos tipos de aplicações (nomeadamente em argamassas de regularização).

**Termos chave:** Resíduo de construção e demolição, cinza volante, argamassa, cimento





# ABSTRACT

The construction industry, responsible for an high consume of natural resources, always use construction processes that results on a significant amount of waste, namely construction and demolition waste (CDW).

On the other hand, thermoelectric power plants, which produces electric energy from burning of coal, generates an high quantity of industrial waste designated as fly ashes (compliant and non-compliant).

The construction and demolition waste and the non-compliant fly ashes - with high carbon content and, therefore non-commercialized -, are destined to landfilling, causing environmental impact and ecological issues.

Both the fly ashes (because of its pozzolanic properties) and the recycled aggregates from CDW, have great potential for reuse. Thus, the use of these wastes is a viable alternative to the use of "traditional materials" promoting the development of a sustainable construction.

This dissertation aims the study of the joint incorporation of these wastes in mortars, searching an alternative to landfill. For such, in the experimental part of the work, 10 different cement mortars with fine standard aggregate, recycled fine aggregate and a combination of both types of aggregates, were produced. For comparison purposes, two of the mortars are considered reference mortars (without binder replacement); on the remaining mortars 1/6 of the volume of cement was replaced by compliant and non-compliant fly ashes. All mortars were produced with a volumetric composition of 1:3 (binder: aggregate) with 100 and 50% by weight of the standardized aggregate replaced by recycled aggregate; mortars with cement replaced by fly ashes with a volumetric composition of 1:0,2:3,6 (binder: fly ash: aggregate). After 28 days later of hardening, their mechanical and physical properties were evaluated.

The incorporation of recycled aggregates and fly ashes in the production of new mortars, caused, among other things, the increase of the porosity and subsequent decreased of the mechanical strength, compared to reference mortars. However, in view of reuse of waste for the manufacture of mortars, the obtained results were generally positive for some kind of applications.

**Keywords:** Construction and demolition waste, fly ash, mortar, cement



# LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

## SIGLAS

APA	Agência Portuguesa do Ambiente
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEN	Comité Européen de Normalisation
EN	European Norm
DEC	Departamento de Engenharia Civil
FRX	Espectrometria de fluorescência de raios X
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
IPQ	Instituto Português da Qualidade
LER	Lista Europeia de Resíduos
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NP	Norma Portuguesa
REN	Rede Elétrica Nacional
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
SGR	Sociedade Gestora de Resíduos, SA
UNL	Universidade Nova de Lisboa

## NOTAÇÕES ESCALARES LATINAS

A	Área
A <sub>1</sub>	Área da pastilha quadrada
A <sub>2</sub>	Área da pastilha circular
a/l	Relação água/ligante
b	Lado da secção quadrada do provete
Ba	Baridade
C	Compacidade
CC	Coeficiente de absorção de água por capilaridade
D	Máxima dimensão do agregado
DP	Desvio padrão
d	Mínima dimensão do agregado
E <sub>din</sub>	Módulo de elasticidade dinâmico
Esp	Espalhamento
F	Força de rotura

$F_c$	Força de rotura à compressão
$F_f$	Força de rotura à flexão
$f_0$	Frequência de ressonância longitudinal
$g$	Aceleração da gravidade
$h$	Lado da secção quadrada do provete ou hora
HR	Humidade relativa
IS	Índice de secagem
$L$	Comprimento do provete
$l$	Distância entre apoios do suporte do provete
$M$	Massa do recipiente preenchido com o material
$M_1$	Massa do provete seco
$M_2$	Massa dos provetes imersos
$M_3$	Massa dos provetes saturados
$m_i$	Massa do provete no instante $i$
$m_t$	Quantidade de água absorvida até o instante $t$
min	Minuto
MVA	Massa volúmica aparente
MVR	Massa volúmica real
$P$	Porosidade
PA	Porosidade aberta
$R_c$	Resistência à compressão
$R_t$	Resistência à tração por flexão
$S$	Área da pastilha circular ou área da face em contacto com a água
$T$	Temperatura
TS	Taxa de secagem
$t$	Tempo
$V$	Volume do recipiente
VA	Valor assintótico

## NOTAÇÕES ESCALARES GREGAS

$\rho$	Massa volúmica
$\sigma'$	Tensão de aderência associada a pastilha quadrada
$\sigma$	Tensão de aderência associada a pastilha circular

## ARGAMASSAS DE CIMENTO

N	Argamassa de cimento e agregado normalizado
NVc	Argamassa de cimento, agregado normalizado e cinzas volantes conformes
NVnc	Argamassa de cimento, agregado normalizado e cinzas volantes não-conformes
R	Argamassa de cimento e agregado reciclado
RVc	Argamassa de cimento, agregado reciclado e cinzas volantes conformes
RVnc	Argamassa de cimento, agregado normalizado e cinzas volantes não-conformes
NRVc	Argamassa de cimento, agregado normalizado, agregado reciclado e cinzas volantes conformes
NRVnc	Argamassa de cimento, agregado normalizado, agregado reciclado e cinzas volantes não-conformes
R´r	Argamassas de agregado reciclado (remanescente) e retardador de presa
R´	Argamassas de agregado reciclado (remanescente)



# ÍNDICE

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	1
1.2.	OBJETIVO .....	2
1.3.	ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	3
<b>2.</b>	<b>ENQUADRAMENTO DO TEMA .....</b>	<b>5</b>
2.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	5
2.2.	ARGAMASSAS.....	7
2.2.1.	<i>Agregados - Resíduos de Construção e Demolição (RCD)</i> .....	7
2.2.2.	<i>Adições Pozolânicas - Cinzas Volantes</i> .....	14
2.2.3.	<i>Ligante - Cimento</i> .....	21
2.2.4.	<i>Água</i> .....	22
2.3.	TRABALHOS EXPERIMENTAIS .....	22
2.4.	LINHA DE INVESTIGAÇÃO NO ÂMBITO DA INCORPORAÇÃO DE RCD E CINZAS VOLANTES NÃO CONFORMES EM ARGAMASSAS .....	36
<b>3.</b>	<b>DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>45</b>
3.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	45
3.2.	MATERIAIS UTILIZADOS NA PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS .....	46
3.2.1.	<i>Ligante – Cimento</i> .....	46
3.2.2.	<i>Agregados</i> .....	46
3.2.3.	<i>Adições pozolânicas – Cinzas volantes</i> .....	47
3.2.4.	<i>Água</i> .....	48
3.3.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	48
3.3.1.	<i>Análise granulométrica dos agregados</i> .....	48
3.3.2.	<i>Baridade</i> .....	51
3.4.	FORMULAÇÃO DAS ARGAMASSAS.....	52
3.5.	PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS .....	54
3.5.1.	<i>Amassadura</i> .....	55
3.5.2.	<i>Moldagem</i> .....	58
3.6.	CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS FRESCAS .....	59
3.6.1.	<i>Ensaio de consistência por espalhamento</i> .....	59
3.7.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS ENDURECIDAS .....	61
3.7.1.	<i>Módulo de elasticidade dinâmico</i> .....	63

3.7.2.	<i>Resistências à tração por flexão e à compressão.....</i>	<i>65</i>
3.7.3.	<i>Capilaridade .....</i>	<i>69</i>
3.7.4.	<i>Secagem .....</i>	<i>75</i>
3.7.5.	<i>Massa volúmica aparente, massa volúmica real e porosidade aberta .....</i>	<i>79</i>
3.7.6.	<i>Aderência ao suporte .....</i>	<i>82</i>
3.8.	SÍNTESE DOS RESULTADOS .....	84
<b>4.</b>	<b>DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....</b>	<b>85</b>
4.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAS.....	85
4.2.	CARACTERÍSTICAS DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO .....	85
4.2.1.	<i>Consistência.....</i>	<i>85</i>
4.3.	CARACTERÍSTICAS DAS ARGAMASSAS ENDURECIDAS.....	88
4.3.1.	<i>Resistências mecânicas .....</i>	<i>88</i>
4.3.2.	<i>Comportamento face à ação da água .....</i>	<i>91</i>
4.3.3.	<i>Influência da mistura dos agregados.....</i>	<i>99</i>
4.3.4.	<i>Influência do retardador de presa .....</i>	<i>102</i>
<b>5.</b>	<b>ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS .....</b>	<b>105</b>
5.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	105
5.2.	COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DAS ARGAMASSAS ENSAIADAS COM OUTROS AUTORES PESQUISADOS.....	105
5.2.1.	<i>Caracterização das matérias-primas.....</i>	<i>105</i>
5.2.2.	<i>Caracterização das argamassas no estado fresco.....</i>	<i>108</i>
5.2.3.	<i>Caracterização das argamassas endurecidas.....</i>	<i>108</i>
5.3.	TENDÊNCIAS DE RESULTADOS NA PRESENTE LINHA DE INVESTIGAÇÃO .....	115
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>123</b>
6.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	123
6.2.	COMENTÁRIOS FINAIS.....	123
6.3.	PROPOSTAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	126
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>127</b>
	<b>ANEXO I – RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS PROJETOS DE ARGAMASSA.....</b>	<b>135</b>
	<b>ANEXO II – FICHA TÉCNICA DO ADJUVANTE.....</b>	<b>157</b>
	<b>ANEXO III – ANÁLISES QUÍMICAS DO AGREGADO RECICLADO ....</b>	<b>161</b>



<b>ANEXO IV – CERTIFICADO DE CONFORMIDADE DA AREIA NORMALIZADA .....</b>	<b>167</b>
<b>ANEXO V – FICHA TÉCNICA DO AGREGADO RECICLADO .....</b>	<b>171</b>



# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Aterros de resíduos.....	2
Figura 2.1 – Consumo de energia e materiais na produção do cimento .....	6
Figura 2.2 – Distribuição dos RCD pelos vários tipos de origem.....	9
Figura 2.3 – Composição dos RCD .....	10
Figura 2.4 – Processo de triagem dos RCD, na empresa SGR .....	12
Figura 2.5 - Esquema ilustrativo do processo de triagem dos RCD da empresa SGR.....	13
Figura 2.6 – Aplicações de RCD na construção .....	14
Figura 2.7 – Vista geral de centrais termoeletricas.....	15
Figura 2.8 - Vista geral da Central termoeletrica do Pego.....	15
Figura 2.9 – Vista geral do armazenamento das cinzas e do carvão na central do Pego .....	17
Figura 2.10 - Esquema ilustrativo do funcionamento da Central termoeletrica do Pego .....	17
Figura 2.11 – Esquema ilustrativo dos diferentes modos de captação das cinzas .....	18
Figura 2.12 – Aplicabilidade das cinzas .....	20
Figura 3.1 - Cimento CEM II/B-L 32,5 N .....	46
Figura 3.2 - Agregado fino normalizado ( $m=1350\pm5g$ ) .....	46
Figura 3.3 - Recolha do agregado fino reciclado.....	47
Figura 3.4 – Cinzas volantes .....	48
Figura 3.5 – Ensaio de determinação da análise granulométrica.....	49
Figura 3.6 – Curvas granulométricas dos agregados utilizados.....	50
Figura 3.7 – Ensaio de determinação da baridade .....	52
Figura 3.8 – Provates utilizados .....	55
Figura 3.9 – Preparação das argamassas em pasta.....	56
Figura 3.10 – Dificuldade de compactação das argamassas com agregado reciclado .....	56
Figura 3.11 – Análises FRX .....	57
Figura 3.12 – Procedimento da 2ª fase de amassaduras com o adjuvante .....	58
Figura 3.13 – Moldagem e compactação dos moldes prismáticos.....	58
Figura 3.14 – Realização dos provates sobre os tijolos cerâmicos .....	59
Figura 3.15 – Ensaio de consistência por espalhamento das argamassas frescas .....	60
Figura 3.16 - Argamassas com agregados reciclados no ensaio de consistência por espalhamento.....	61
Figura 3.17 – Sala de ambiente condicionado .....	61
Figura 3.18 – Esquema ilustrativo da sequência dos ensaios .....	62
Figura 3.19 – Equipamentos utilizados na determinação do módulo de elasticidade.....	63
Figura 3.20 – Resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico .....	65
Figura 3.21 - Esquema ilustrativo do ensaio de resistência à tração por flexão .....	66
Figura 3.22 – Ensaio de resistência à tração por flexão.....	66

Figura 3.23 – Esquema ilustrativo do ensaio de resistência à compressão .....	67
Figura 3.24 – Ensaio de resistência à compressão .....	67
Figura 3.25 – Resultados médios obtidos no ensaio de resistência à compressão e resistência à tração por flexão .....	68
Figura 3.26 – Ensaio de capilaridade.....	69
Figura 3.27 - Curvas de absorção por capilaridade das argamassas ensaiadas .....	70
Figura 3.28 - Curvas de absorção por capilaridade das argamassas ensaiadas .....	71
Figura 3.29 - Curvas de absorção de água por capilaridade de todas as argamassas ensaiadas na primeira hora de ensaio.....	72
Figura 3.30 – Curvas de absorção de água por capilaridade na primeira hora de ensaio.....	73
Figura 3.31 - Valores médios e desvios-padrão do valor assintótico dos provetes inteiros .....	74
Figura 3.32 - Valores médios e respectivos desvios-padrão do coeficiente de capilaridade dos provetes ensaiados .....	74
Figura 3.33 – Provetes durante o ensaio de secagem.....	75
Figura 3.34 - Curvas de secagem das argamassas estudadas .....	76
Figura 3.35 – Curvas de secagem das argamassas estudadas .....	77
Figura 3.36 – Valores médios e respectivos desvios-padrão do índice de secagem .....	78
Figura 3.37 - Valores médios e respectivos desvios-padrão da taxa de secagem .....	78
Figura 3.38 – Ensaio de determinação da massa volúmica.....	79
Figura 3.39 – Valores médios da porosidade aberta .....	81
Figura 3.40 – Valores médios da massa volúmica real e aparente.....	81
Figura 3.41 – Ensaio de aderência ao suporte.....	82
Figura 3.42 – Destacamentos da argamassa .....	84
 Figura 4.1 – Comparação entre a relação água/ligante e a porosidade aberta das argamassas com agregado fino normalizado (N) e agregado fino reciclado (R).....	86
Figura 4.2 - Comparação entre a relação água/ligante e porosidade aberta das argamassas com agregado fino normalizado (N) com cinzas volantes conformes (NVc) e não conformes (NVnc).....	87
Figura 4.3 - Relação entre a relação água/ligante e porosidade aberta das argamassas com agregado fino reciclado (R) com cinzas volantes conformes (RVc) e não conformes (RVnc) .....	88
Figura 4.4 – Relação entre as resistências mecânicas e porosidade aberta das argamassas com agregado fino normalizado (N) e agregado fino reciclado (R) .....	89
Figura 4.5 - Relação entre as resistências mecânicas e porosidade aberta das argamassas com agregado fino normalizado (N), com cinzas volantes conformes (NVc) e não conformes (NVnc) .....	90
Figura 4.6 - Relação entre as resistências mecânicas e porosidade aberta das argamassas com agregado fino reciclado (R), com cinzas volantes conformes (RVc) e não conformes (RVnc).....	90
Figura 4.7 - Comparação entre a porosidade aberta e o valor assintótico das argamassas com agregado fino normalizado (N) e agregado fino reciclado (R) .....	92

Figura 4.8 – Comparação entre a porosidade aberta e o valor assintótico das argamassas com agregado fino normalizado (N) com adição de cinzas volantes conformes (NVc) e não conformes (NVnc) .....	92
Figura 4.9 - Comparação entre a porosidade aberta e o valor assintótico das argamassas com agregado fino reciclado (R) com adição de cinzas volantes conformes (RVc) e não conformes (RVnc) .....	93
Figura 4.10 – Resultados do valor assintótico estimado e medido experimentalmente.....	94
Figura 4.11 - Comparação entre a taxa de secagem e o coeficiente de capilaridade das argamassas com agregado fino normalizado (N) e agregado fino reciclado (R).....	95
Figura 4.12 - Comparação entre a taxa de secagem e o coeficiente de capilaridade das argamassas com agregado fino normalizado (N) com adição de cinzas volantes conformes (NVc) e não conformes (NVnc) .....	95
Figura 4.13 - Comparação entre a taxa de secagem e o coeficiente de capilaridade das argamassas com agregado fino reciclado (R) com adição de cinzas volantes conformes (RVc) e não conformes (RVnc).....	96
Figura 4.14 - Comparação entre o índice de secagem e a porosidade aberta das argamassas com agregado fino normalizado (N) e agregado fino reciclado (R) .....	97
Figura 4.15 - Comparação entre a taxa de secagem e o coeficiente de capilaridade das argamassas com agregado fino normalizado (N) com adição de cinzas volantes conformes (NVc) e não conformes (NVnc) .....	98
Figura 4.16 - Comparação entre a taxa de secagem e o coeficiente de capilaridade das argamassas com agregado fino reciclado (R) com adição de cinzas volantes conformes (RVc) e não conformes (RVnc).....	98
Figura 4.17 - Relação entre resistências mecânicas e módulo de elasticidade das argamassas com cinzas volantes.....	99
Figura 4.18 – Relação entre porosidade aberta e índice de secagem das diferentes argamassas .....	100
Figura 4.19 - Relação entre o coeficiente de capilaridade e a taxa de secagem das diferentes argamassas .....	101
Figura 4.20 - Relação entre a porosidade e o valor assintótico das diferentes argamassas .....	101
Figura 4.21 – Comparação entre resistências mecânicas da argamassa de referência com as argamassas de 2ª fase - material sobran­te (agregado remanescente).....	103
Figura 5.1 – Resultados do ensaio de baridade dos diferentes agregados .....	106
Figura 5.2 – Baridade do cimento .....	107
Figura 5.3 – Baridade das cinzas volantes.....	107
Figura 5.4 – Resultados obtidos no ensaio de consistência por espalhamento .....	108
Figura 5.5 - Resultados dos ensaios de resistências mecânicas das argamassas de cimento com agregados normalizados e naturais, com traços volumétricos.....	109
Figura 5.6 - Resultados dos ensaios de resistências mecânicas das argamassas de cimento com agregados reciclados, com traços volumétricos .....	110

Figura 5.7 - Resultados dos ensaios de resistências mecânicas das argamassas de agregado normalizado e cinzas volantes.....	111
Figura 5.8 – Resultados do ensaio de aderência ao suporte .....	112
Figura 5.9 - Resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade – coeficiente de capilaridade .....	113
Figura 5.10 - Resultados obtidos no ensaio de massa volúmica aparente das argamassas .....	115
Figura 5.1 - Análise qualitativa das características das argamassas de agregado fino reciclado relativamente às argamassas de agregado fino normalizado .....	119
Figura 5.12 - Análise qualitativa das características das argamassas de agregado fino reciclado com cinzas volantes relativamente às argamassas de agregado fino normalizado sem cinzas volantes .....	120
Figura 5.13 - Análise qualitativa das características das argamassas de agregado fino reciclado com cinzas relativamente às argamassas de agregado fino reciclado sem cinzas .....	122

# ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação do capítulo 17 dos RCD segundo a LER .....	8
Tabela 2.2 - Classificação dos RCD do subcapítulo 17 09 segundo a LER .....	8
Tabela 2.3 – Limites de perda ao fogo exigidos pelas diferentes normas .....	19
Tabela 2.4 – Trabalhos experimentais de referência .....	23
Tabela 2.5 - Caracterização física dos materiais utilizados por P. Faria, 2004.....	24
Tabela 2.6 - Resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas de cimento ensaiadas por P. Faria, 2004.....	24
Tabela 2.7 - Caracterização física dos materiais utilizados por M. Braga, 2010.....	25
Tabela 2.8 - Resultados dos ensaios no estado fresco das argamassas de cimento ensaiadas por M. Braga, 2010 .....	26
Tabela 2.9 - Resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas de cimento ensaiadas por M. Braga, 2010.....	26
Tabela 2.10 - Resultados médios obtidos no ensaio de aderência ao suporte obtidos por M. Braga, 2010 .....	26
Tabela 2.11 - Caracterização física dos materiais utilizados por C. Neno, 2010.....	27
Tabela 2.12 - Resultados dos ensaios no estado fresco das argamassas de cimento ensaiadas por C. Neno, 2010 .....	27
Tabela 2.13 - Resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas de cimento ensaiadas por C. Neno, 2010.....	28
Tabela 2.14 - Resultados médios obtidos no ensaio de aderência ao suporte por C. Neno, 2010 .....	28
Tabela 2.15 - Composição das argamassas estudadas por P. Torkittikul, 2010.....	29
Tabela 2.16 - Características dos agregados utilizados por P. Torkittikul, 2010.....	29
Tabela 2.17 - Resultados médios obtidos nos ensaios realizados nas argamassas de cimento ensaiadas por P. Torkittikul, 2010.....	30
Tabela 2.18 – Características dos materiais utilizados por J. Brito, 2013 .....	30
Tabela 2.19 - Resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas de cimento ensaiadas por J. Brito, 2013 .....	31
Tabela 2.20 - Resultados médios obtidos no ensaio de aderência ao suporte por J. Brito, 2013 .....	31
Tabela 2.21 – Características dos materiais utilizados por F. Lima, 2005 .....	32
Tabela 2.22 - Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas de cimento ensaiadas por F. Lima, 2005.....	32
Tabela 2.23 – Baridade dos agregados utilizados por I. Vegas, 2009 .....	33
Tabela 2.24 - Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas de cimento ensaiadas por I. Vegas, 2009.....	33
Tabela 2.25 - Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas de cimento ensaiadas por C. Júnior, 2011.....	34
Tabela 2.26 – Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados utilizados por R. Pedrozo, 2008 .	34

Tabela 2.27 - Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas de cimento ensaiadas por R. Pedrozo, 2008 .....	35
Tabela 2.28 - Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas de cimento ensaiadas por J. Siqueira, 2012 .....	35
Tabela 2.29 - Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas de cimento ensaiadas por C. Christy, 2010 .....	36
Tabela 2.30 - Trabalhos experimentais inseridos na linha de investigação .....	37
Tabela 2.31 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados utilizados por A. Barra, 2011 .....	37
Tabela 2.32 - Resultados dos ensaios no estado fresco das argamassas de cimento ensaiadas por A.Barra, 2011 .....	38
Tabela 2.33 - Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas de cimento ensaiadas por A. Barra, 2011 .....	38
Tabela 2.34 - Resultados do ensaio de aderência ao suporte realizado por A.Barra, 2011 .....	38
Tabela 2.35 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados utilizados por A.Mana, 2013 .....	39
Tabela 2.36 - Resultados dos ensaios no estado fresco das argamassas de cal aérea ensaiadas por A.Mana, 2013 .....	40
Tabela 2.37 - Resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas de cal aérea ensaiadas por A.Mana, 2013 .....	40
Tabela 2.38 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados utilizados por R.Santos, 2013 .....	41
Tabela 2.39 - Resultados dos ensaios no estado fresco das argamassas de cal aérea ensaiadas por R. Santos, 2013 .....	41
Tabela 2.40 - Resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas de cal aérea ensaiadas por R. Santos, 2013 .....	41
Tabela 2.41 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados utilizados por R. Frutuoso, 2013 .....	43
Tabela 2.42 - Resultados dos ensaios no estado fresco das argamassas de cal aérea ensaiadas por R. Frutuoso, 2013 .....	43
Tabela 2.43 - Resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas de cal aérea com agregados reciclados ensaiadas por R. Frutuoso, 2013 .....	43
Tabela 2.44 - Resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas de cal aérea com agregados normalizados ensaiadas por R. Frutuoso, 2013 .....	44
 Tabela 3.1 - Percentagem de perda ao fogo das amostras e classificadas segundo a norma NP EN 450-1 ...	47
Tabela 3.2 - Peneiros utilizados na análise granulométrica dos diferentes agregados .....	48
Tabela 3.3 - Características físicas dos agregados .....	51
Tabela 3.4 - Resultados médios das baridades dos constituintes das argamassas .....	52
Tabela 3.5 - Designações das siglas utilizadas na identificação das argamassas estudadas .....	54
Tabela 3.6 – Proporções entre os componentes em volume .....	54
Tabela 3.7 – Quantificação dos provetes para a caracterização das argamassas endurecidas .....	55
Tabela 3.8 - Resultados do ensaio de consistência por espalhamento .....	60
Tabela 3.9 – Resultados médios e desvio padrão do módulo de elasticidade dinâmico .....	64



Tabela 3.10 – Valores de módulo de elasticidade dinâmico obtido por outros autores em argamassas de cimento .....	65
Tabela 3.11 – Resultados médios dos ensaios de resistência à tração por flexão e à compressão.....	68
Tabela 3.12 - Resultados médios do ensaio de absorção por capilaridade .....	73
Tabela 3.13 – Resultados médios e desvios-padrão do ensaio de secagem .....	77
Tabela 3.14 - Valores médios e desvios-padrão da massa volúmica real e aparente e da porosidade aberta .....	80
Tabela 3.15 – Resultados médios do ensaio de aderência ao suporte.....	83
Tabela 3.16 – Síntese dos resultados obtidos na campanha experimental .....	84
Tabela 4.1 – Valor assintótico .....	94
Tabela 5.1 – Designações e composições das argamassas estudadas nos diferentes trabalhos da linha de investigação em comparação com a presente dissertação .....	116
Tabela 5.2 – Análise qualitativa das características das argamassas de agregado fino reciclado relativamente às argamassas de agregado fino normalizado .....	118
Tabela 5.3 – Análise qualitativa das características das argamassas de agregado fino reciclado com cinzas volantes relativamente às argamassas de agregado fino normalizado sem cinzas volantes .....	120
Tabela 5.4 – Análise qualitativa das características das argamassas de agregado fino reciclado com cinzas relativamente às argamassas de agregado fino reciclado sem cinzas .....	121



# **Capítulo 1**

## **INTRODUÇÃO**

### **1.1. Considerações iniciais**

A intensa industrialização, novas tecnologias e o crescimento populacional ao longo do tempo repercutiu-se num aumento do consumo de recursos naturais e de energia de forma acentuada. A progressiva preocupação relativamente à diminuição das reservas de matérias-primas existentes requer um aumento da sensibilização dos técnicos e da população em geral face à sua reutilização, bem como o destino a dar aos elementos sobranes (resíduo) [Zordan, 2002].

A indústria da construção é um dos sectores mais ativos e consumidores de recursos, sejam eles matérias-primas (água, madeiras, minerais) ou energia produzida. Além disso, os resíduos de construção e demolição produzidos representam cerca de 50% dos resíduos urbanos sólidos [Angulo, 2005]. Uma das formas do sector da construção contornar os problemas que enfrenta face à insuficiência de locais próprios para a receção de resíduos e dos custos associados ao seu transporte e aterro, consiste no reaproveitamento de resíduos gerados quer pelas indústrias da construção como por outras indústrias, nomeadamente centrais termoelétricas, figura 1.1.

Para além das quantidades significativas que estão associadas à produção de resíduos, estes apresentam outras particularidades que dificultam a sua gestão, de entre as quais destaca-se a sua constituição heterogénea com frações de dimensões variadas e diferentes níveis de perigosidade.



a) Aterro de RCD; b) Aterro de cinzas volantes

Figura 1.1 – Aterros de resíduos

A deposição em aterros dos vários tipos de resíduos produzidos contribuem significativamente para agravar problemas ambientais, nomeadamente no que diz respeito ao seu transporte e deposição. Estas atividades podem constituir agressões ao ambiente devido a [Durão, 2004]:

- Deterioração da qualidade do ar (libertação de poeiras e odores);
- Deterioração da qualidade do solo (compactação e alteração da composição);
- Contaminação das águas superficiais e subterrâneas;
- Agressão à paisagem, provocando uma poluição visual grave.

Face a esta preocupação ambiental várias entidades têm desenvolvido projetos para uma utilização de resíduos na indústria da construção, nomeadamente em materiais de construção. De forma a garantir bons resultados na incorporação dos resíduos reciclados no mercado é necessário avaliar e apostar em trabalhos de investigação que permitam aprofundar o conhecimento das suas propriedades e determinar as suas condições de aplicabilidade, diminuindo a utilização de importantes recursos naturais e custos de deposição dos resíduos em aterro [Amorim, 2008].

## **1.2. Objetivo**

A presente dissertação desenvolvida no âmbito do mestrado integrado em Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, enquadra-se no desenvolvimento e estudo da reutilização e incorporação de agregados finos reciclados e cinzas volantes não conformes em argamassas.

Pretende-se contribuir para o aprofundamento da investigação existente no domínio da gestão e viabilidade de utilização de resíduos de construção e demolição (RCD) e de resíduos de cinzas, de modo a minimizar o impacto ambiental e a reduzir a utilização de recursos naturais. Para tal é necessário analisar sob o ponto de vista experimental o comportamento físico e mecânico das argamassas com incorporação de resíduos, em comparação com uma argamassa base de características conhecidas.

A presente dissertação insere-se no seguimento de estudos realizados por BARRA, Ana (2010) - *Caracterização física e mecânica de argamassas não estruturais com agregados finos reciclados*, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa; por MANA, Ana (2013) – *Influência das cinzas volantes não conformes em argamassas de cal aérea* Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa; por SANTOS, Rita (2013) – *Influência de agregados reciclados provenientes de RCD no desempenho de argamassas de cal aérea*, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa e por FRUTUOSO, Raquel (2013) – *Influência de agregados provenientes de RCD e cinzas volantes não conformes em argamassas de cal aérea*, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa.

Esta linha de investigação surge na sequência de um pedido de uma empresa de gestão de resíduos com vista à definição de uma unidade industrial de produção de agregados finos reciclados. Foi solicitada a avaliação da viabilidade da integração de RCD em materiais de construção. De forma análoga, outra empresa propôs a análise da integração de parte das cinzas volantes não conformes provenientes da Central termoeleétrica do Pego na produção de argamassas e outros produtos industriais [Pinho, 2013].

### **1.3. Estrutura e organização da dissertação**

Para a realização da presente investigação, com os objetivos atrás referidos, o trabalho foi dividido em diferentes fases.

No **capítulo 1**, surgem as considerações iniciais, os objetivos e a organização da estrutura da dissertação.

No **capítulo 2**, após uma pesquisa bibliográfica, de modo a obter informação geral sobre o tema, são apresentadas as principais características dos constituintes das argamassas e sintetizam-se alguns trabalhos de investigação já realizados neste âmbito e os seus resultados.

No **capítulo 3**, descrevem-se os procedimentos de ensaio e os resultados médios obtidos da caracterização dos materiais utilizados e das argamassas no estado fresco e endurecido.

No **capítulo 4**, são discutidos os resultados e comparados com os trabalhos de investigação já realizados e referidos no capítulo II.

No **capítulo 5**, apresentam-se e descrevem-se as principais conclusões permitidas por esta campanha experimental e apresentam-se novos desenvolvimentos possíveis neste âmbito.

Esta dissertação inclui a bibliografia que serviu de referência para este trabalho e os anexos referenciados ao longo do texto.

Todas as tabelas e figuras incluídas no texto sem referência bibliográfica foram obtidas pela autora.



## **Capítulo 2**

### **ENQUADRAMENTO DO TEMA**

#### **2.1. Considerações iniciais**

A crescente industrialização tem provocado um aumento do impacto ambiental, originado pelas elevadas emissões de poluição e pelo consumo desequilibrado e excessivo de matérias-primas. O consumo descontrolado dos recursos naturais está a causar importantes danos ambientais, como o efeito estufa, variações térmicas, alterações nos habitats de vários seres vivos e, conseqüentemente, a diminuição/extinção destes.

As ações humanas diárias, aparentemente inocentes e inconscientes, muitas vezes têm conseqüências profundas no nosso planeta, como o consumo excessivo de água, de petróleo, carvão entre outras. O uso excessivo e descontrolado dos recursos naturais, (consumismo exagerado) aliado a uma grande produção de resíduos, são marcas de degradação ambiental.

A “pegada ecológica” procura dar uma estimativa do impacto que o estilo de vida adotado pelo ser humano tem sobre o planeta, avaliando até que ponto a biosfera tem capacidade de disponibilizar e renovar os seus recursos naturais, assim como absorver os resíduos e os poluentes que são gerados ao longo dos anos [Quercus, 2013]. Segundo a World Wide Fund (WWF), a pegada ecológica da humanidade duplicou desde 1966. O planeta precisa de 1,5 anos para regenerar os recursos renováveis de que as pessoas dependem e absorver os resíduos produzidos. Verifica-se assim, que os recursos estão a ser consumidos a um ritmo superior à sua capacidade de regeneração. A bio capacidade do planeta, ou seja, a quantidade de área biologicamente produtiva disponível às necessidades humanas, tem sido excedida em 25%. Este facto é explicado pelo crescimento populacional e evolução da sociedade, que se prevê atingir os 9,3 mil milhões de pessoas em 2050 [LRP, 2012].

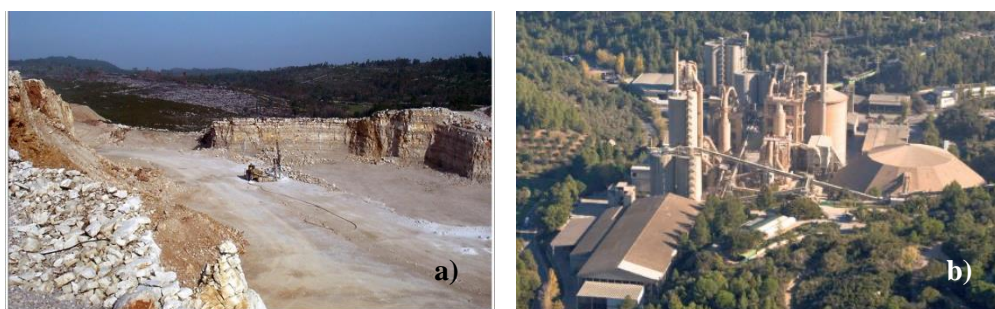
O Living Planet Report [LPR, 2012] evidencia a pressão que a humanidade está a colocar sobre o planeta Terra: “estamos a usar mais de 50% dos recursos que a Terra pode e tem para oferecer. Em 2025, até dois planetas não serão suficientes”.

Nas últimas décadas, a sustentabilidade tem adquirido uma importância cada vez maior e a sociedade tem vindo a consciencializar-se de que é necessário moderar a utilização/consumo dos recursos naturais. Considera-se que um desenvolvimento sustentável é um processo de mudanças na exploração de recursos e na orientação do desenvolvimento tecnológico, visando satisfazer as necessidades do presente sem comprometer as gerações futuras, ou seja, possibilitar que as pessoas, agora e no futuro, atinjam um nível satisfatório de desenvolvimento social, económico e cultural, e simultaneamente, preservando o meio envolvente [Zordan, 2002].

Em Portugal, a Estratégia Nacional de Desenvolvimento Sustentável (ENDS), que visa o período 2005/15, consiste num conjunto coordenado de atuações que, partindo da situação atual, com as suas fragilidades e potencialidades, permitam num horizonte de 12 anos assegurar um crescimento económico célere e vigoroso, uma maior coesão social, e um elevado e crescente nível de proteção e valorização do ambiente [Mota, 2005].

A incorporação de resíduos na construção civil é uma alternativa bastante benéfica, tendo em vista a redução do consumo de recursos minerais, como a exploração de pedreiras, figura 2.1 a). As fábricas de produção de cimento Portland, figura 2.1 b), necessitam de um elevado consumo de energia e de matérias-primas, tais como, 1.000 milhões de toneladas de água, 1.500 milhões de toneladas de cimento e 10.000 milhões de toneladas de agregados. Da totalidade das emissões de CO<sub>2</sub> resultantes da produção de betão são libertadas 0,92 toneladas de CO<sub>2</sub> por cada tonelada de clínquer produzido [Becchio et al., 2009; Habert et al., 2009 citado por Mália, 2010].

Além da diminuição dos recursos naturais, os resíduos produzidos pelas várias indústrias provocam impactos ambientais como a desmatção das florestas, os lixos urbanos, os depósitos clandestinos entre outros. A indústria da construção gera mais de 100 milhões de toneladas de resíduos por ano em toda a União Europeia [APA, 2013].



a) Exploração de uma pedreira; b) Fábrica de Cimento, Secil [Secil, 2013]

Figura 2.1 – Consumo de energia e materiais na produção do cimento



## 2.2. Argamassas

A argamassa pode ser designada como uma mistura homogénea de agregado fino, ligante (s) e água, podendo adicionar-se elementos como adjuvantes e aditivos, que favorecem determinadas características à mistura, nomeadamente a sua estrutura química e o endurecimento da pasta [Silva, 2008; Margalha, 2010].

Na presente dissertação utilizaram-se agregados normalizados e reciclados provenientes de RCD, cimento como ligante e adições pozolânicas. Em seguida são apresentadas as características dos constituintes das argamassas utilizados no presente trabalho experimental.

### 2.2.1. Agregados - *Resíduos de Construção e Demolição (RCD)*

Os agregados representam a componente maioritária das argamassas, sendo assim os principais responsáveis pelo comportamento das argamassas. Fatores como a dureza, a forma dos grãos, a granulometria e a porosidade dos agregados afetam o comportamento das argamassas. O agregado confere coesão à mistura através da ligação dos seus grãos ao ligante. Os agregados são classificados segundo a sua origem (naturais, artificiais ou reciclados), a forma e dimensão das partículas (angulares ou arredondados e grossos ou finos) e massa volúmica (leves, médios ou pesados) [Margalha, 2010; Botas, 2009].

Na presente dissertação, importa aprofundar os agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição para a produção de argamassas.

Sendo uma atividade secular, a construção civil tem vindo a conhecer grandes desenvolvimentos técnicos, nomeadamente dos materiais que utiliza e dos processos em que se baseia. Esta faz-se sempre acompanhar de processos que, durante a sua execução e após a sua conclusão, geram uma grande quantidade de resíduos, normalmente depositados em aterros.

A construção civil é uma fonte geradora de grandes quantidades de resíduos, estimando-se uma produção anual global na União Europeia de 180 milhões de toneladas, sendo que 75 % dos resíduos têm como destino final o aterro, apesar de seu grande potencial de reciclagem [Corinaldesi, 2009]. De acordo com a última informação o Instituto Nacional de Estatística (INE) estima que a economia portuguesa gerou cerca de 11 milhões de toneladas de resíduos de construção respeitantes ao ano de 2010 [INE, 2013].

Segundo a Portaria nº209/2004, entende-se por Resíduo “qualquer substância ou objeto de que o detentor se desfaz, ou tem intenção ou obrigatoriedade de se desfazer, nomeadamente os identificados na Lista Europeia de Resíduos...” e RCD o “resíduo proveniente de obras de construção, reconstrução, ampliação, alteração, conservação, demolição e da derrocada de edificações.”

Para uma melhor compreensão, é necessário conhecer o enquadramento legal dos RCD, nomeadamente o que diz respeito às leis do quadro legal nacional em vigor, que definem e regem a gestão destes resíduos [Silva 2011]:

- Lei de Bases do Ambiente – Lei nº 11/87, de 7 de Abril, alterada pela Lei nº 13/2002, de 19 de Fevereiro;
- Portarias nº 209/2004, de 3 de Março (LER – Lista Europeia de Resíduos), nº 417/2008, de 11 de Junho e nº 335/97, de 16 de Maio.
- Decretos – Lei nº 178/2006, de 5 de Setembro, que estabelece o regime geral da gestão de Resíduos e nº 46/2008, de 12 de Março, Novo Regime de Gestão de Resíduos de Construção e Demolição);

Com o objetivo de classificar os diferentes tipos de resíduos de acordo com a sua fonte geradora, a Portaria n.º 209/2004 de 3 de Março, define um código de seis dígitos para os resíduos e, respetivamente, de dois e quatro dígitos para os números dos capítulos e subcapítulos. No presente trabalho, destacam-se os RCD descritos no capítulo 17 – Subcapítulo 17 09 da Lista Europeia de Resíduos (LER), descritos nas tabelas 2.1 e 2.2. Sendo a matéria-prima obtida através de uma mistura de resíduos na zona de pré-triagem considera-se que no código 17 09 04 estão contidos todos os outros códigos 17 à exceção dos que contêm resíduos perigosos.

Tabela 2.1 - Classificação do capítulo 17 dos RCD segundo a LER [Portaria n.º 209/2004]

<b>17</b>	<b>Resíduos de Construção e Demolição</b>
17 01	Betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos
17 02	Madeira, vidro e plásticos
17 03	Misturas betuminosas, alcatrão e produtos de alcatrão
17 04	Metais (incluindo ligas)
17 05	Solos, rochas e lamas
17 06	Materiais de isolamento e materiais de construção contendo amianto
17 08	Materiais de construção à base de gesso
<b>17 09</b>	<b>Outros resíduos de construção e demolição</b>

Tabela 2.2 - Classificação dos RCD do subcapítulo 17 09 segundo a LER [Portaria n.º 209/2004]

<b>17 09</b>	<b>Outros resíduos de construção e demolição</b>
17 09 01	Resíduos de construção e demolição contendo mercúrio
17 09 02	Resíduos de construção e demolição contendo PCB
17 09 03	Outros resíduos de construção e demolição contendo substâncias perigosas
<b>17 09 04</b>	<b>Mistura de resíduos de construção e demolição não abrangidos em 17 09 01, 17 09 02 e 17 09 03</b>

Apresenta-se em seguida as principais características dos resíduos, a sua composição e classificação, a normalização existente e as aplicações que estes materiais têm tido na construção civil e restantes áreas.

### ***Caracterização***

Os resíduos produzidos na construção civil apresentam características diversificadas podendo ser discriminados quanto à sua origem, composição e destino final.

Quanto à sua origem, os RCD podem ser classificados como [Cemfor, 2007 citado por Algarvio, 2009]:

- Resíduos de construção: originados pelo mau aproveitamento de matérias-primas, desperdícios, materiais danificados e das perdas consequentes das técnicas de construção;
- Resíduos de demolição: apresentam-se em maior quantidade, sendo constituídos maioritariamente por material inerte e solos, com características que dependem da obra em causa e da seletividade da demolição;
- Resíduos de remodelação, reabilitação e renovação: apresentam composição muito variada, dependendo da área intervencionada, e apresentam características semelhantes aos resíduos de demolição.

A figura 2.2 apresenta as estimativas sobre a proveniência dos RCD segundo o tipo de obra:

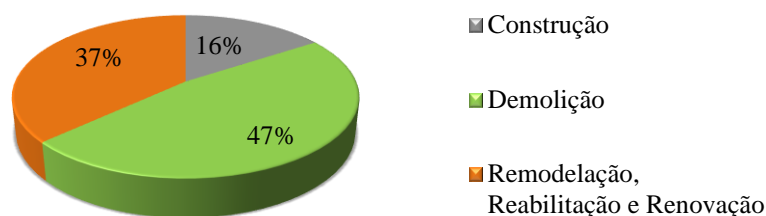


Figura 2.2 – Distribuição dos RCD pelos vários tipos de origem [Silva, 2011]

Os resíduos provenientes da construção civil são os mais heterogêneos dentro do conjunto dos resíduos industriais. Este facto verifica-se devido à sua composição ser condicionada pela região geradora do resíduo, época construção, tipo de utilização que a obra mantinha enquanto funcional como também pelas inúmeras técnicas e metodologias de produção dos diferentes materiais [Gonçalves, 2007].

Relativamente à composição, os RCD podem ser classificados como inertes, não perigosos, perigosos e recicláveis dependendo do tipo de material que se encontra presente na sua constituição, entre os quais [Reis, 2010]:

- Recicláveis: cartão, plástico, madeira, metais;
- Inertes: betão, cerâmicos, vidro, terra, argamassas, alvenaria;
- Perigosos: amianto, asfalto, tinta, verniz;
- Não-perigosos: mistura betuminosa, gesso, fibrocimento, fibra de vidro, lã de rocha.

A fração dos inertes representa mais de 50% do volume total de resíduos, constituída maioritariamente por betão e materiais cerâmicos, embora também se possam encontrar pedras, vidros e metais.

Tendo em consideração várias estimativas e estatísticas, Gonçalves (2007) fez uma média de todos os dados registados e chegou aos valores médios de composição dos RCD representada na figura 2.3.

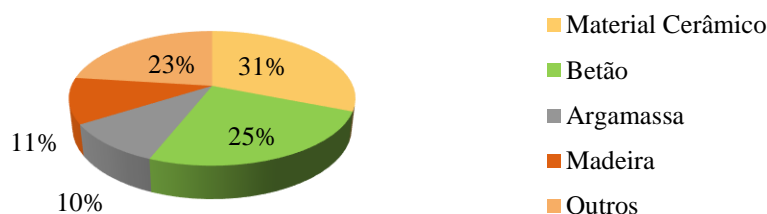


Figura 2.3 – Composição dos RCD [Gonçalves, 2007]

Por último, a classificação segundo o destino final dado aos resíduos de construção [Reis, 2010]:

- Reutilizáveis - resíduos que podem ser reutilizados diretamente no local da obra ou noutras;
- Recicláveis - resíduos que podem ser reciclados;
- Não-recicláveis - resíduos que devido às características ou por se encontra contaminado não podem ser reutilizados.

Com vista a minorar os impactos negativos dos RCD, o processamento destes é realizado através do desenvolvimento de técnicas que privilegiem a redução e prevenção da sua produção, e quando inevitavelmente gerados a sua reutilização ou reciclagem.

A reutilização é a introdução, sem alterações significativas de substâncias, objetos ou produtos nos circuitos de produção ou de consumo, de forma a evitar a produção de resíduos. Esta operação tem como objetivo prolongar o ciclo de vida do material e deve ser desenvolvida sempre que os materiais ainda possuam as suas propriedades e estas possam ser rentabilizadas. No entanto, o material pode ter uma utilidade distinta daquela para a qual foi inicialmente previsto, através de técnicas de manutenção e reparação ou de algumas adaptações. Por outro lado, a reciclagem é a

operação de reprocessamento de resíduos com vista na sua recuperação e ou regeneração das suas matérias constituintes, formando novos produtos [Fraga, 2012; Silva, 2008].

A designação de “agregados reciclados” refere-se assim, a agregados produzidos a partir de materiais previamente usados na construção.

Na fase de construção, uma separação seletiva e a minimização dos materiais de embalagens dos produtos, facilita o encaminhamento dos resíduos e melhora a sua qualidade. O prolongamento da vida útil dos materiais permite reduzir, a quantidade de RCD gerado, no entanto, quando a demolição é inevitável, a qualidade e a composição dos RCD pode ser melhorada através da demolição seletiva ou desconstrução, sendo necessário, quando possível, garantir o acesso aos materiais a serem removidos e espaço para os colocar [Algarvio, 2009]. A demolição seletiva é um processo de desmantelamento cuidadoso, de modo a possibilitar a separação e recuperação dos diferentes materiais constituintes de um edifício de acordo com as suas características, promovendo à sua máxima valorização [Castro, 2010].

A reutilização é preferível à reciclagem, porque é mais eficaz na redução do volume de resíduos em aterro e na diminuição do consumo de materiais naturais não renováveis. Porém a reutilização, a reciclagem ou qualquer outra forma de valorização de RCD requerem condições em obra para uma adequada triagem [Mália, 2010].

Os resíduos provenientes das atividades da indústria da construção têm sido ao longo dos anos depositados em aterros como “entulho”. Começou então a surgir uma consciência ambiental face a este problema, surgindo assim empresas especializadas na gestão e controlo dos RCD, como a SGR. Em seguida apresenta-se uma descrição do processo de funcionamento da empresa SGR.

### ***Breve descrição do funcionamento da SGR***

A Sociedade Gestora de Resíduos, S.A. (SGR)<sup>1</sup> criada em 2006, é a fusão de 3 sociedades, entre as quais o grupo LOBBE, pioneiro em Portugal pela implementação do tratamento ambiental adequado aos resíduos de construção e demolição.

A atividade desenvolvida pela SGR Ambiente visa na gestão dos resíduos, na medida que atua desde o acondicionamento e triagem dos resíduos em obra, recolha, transporte, tratamento e posterior valorização [SGR, 2013]. A fase inicial da receção dos resíduos é a pesagem dos contentores com carga, acompanhada de uma inspeção visual pelo maquinista que procede a uma classificação prévia de acordo com o código LER.

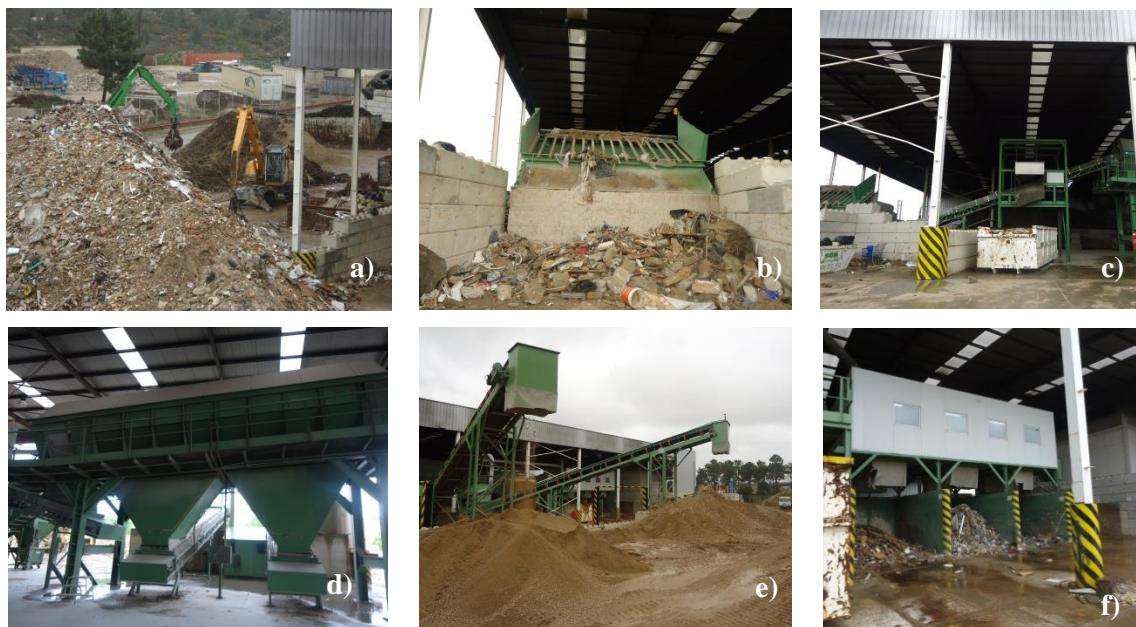
---

<sup>1</sup> Empresa que forneceu os agregados reciclados para a presente dissertação.

Em seguida, as viaturas deslocam-se para a zona de descarga onde é efetuada uma pré triagem grosseira com o auxílio de uma giratória com grifa, figura 2.4 a), onde são seleccionados metais ferrosos, não ferrosos, madeira e pedaços de betão de grandes dimensões, de forma a permitir o bom escoamento da linha de triagem. Após a pré triagem os resíduos são colocados no alimentador vibrante através de uma pá carregadora; o alimentador vibrante, figura 2.4 b), contém uma grelha de entrada com aberturas de cerca 250 mm de largura, evitando a entrada de material com dimensões superiores, que cai para uma cuba e é encaminhado para uma nova triagem. O transportador de saída do alimentador, figura 2.4 c), contém um separador magnético acoplado, de forma a separar os metais ferrosos para um contentor.

De seguida, o material entra no *trommel* (crivo rotativo), figura 2.4 d), composto por perfurações de 20 mm e 40 mm de diâmetro que têm como finalidade permitir que o material caia sob ação gravítica nos transportadores das frações de 0 a 12 mm e de 0 a 32 mm, figura 2.4 e). Estes encaminham o material até ao exterior, onde fica depositado o agregado crivado com as duas granulometrias conforme o tapete por onde saem. A restante mistura de RCD é transferida para o transportador de saída do *trommel* entrando nas cabines da linha de triagem manual, figura 2.4 f), onde são separados para diferentes “cubas” de acordo com o seu código LER.

Todo o processo de triagem e seleção dos resíduos origina um produto, que no final é transportado para o aterro, local onde foi recolhido o material para a presente dissertação.



a) Triagem grosseira com grifa; b) Alimentador vibrante; c) Transportados de saída do alimentador  
d) Crivo rotativo; e) Transportador de saída das frações; f) Cabine de triagem manual

Figura 2.4 – Processo de triagem dos RCD, na empresa SGR

Na figura 2.5 representa-se um esquema ilustrativo simplificado do processo de triagem e separação dos RCD.

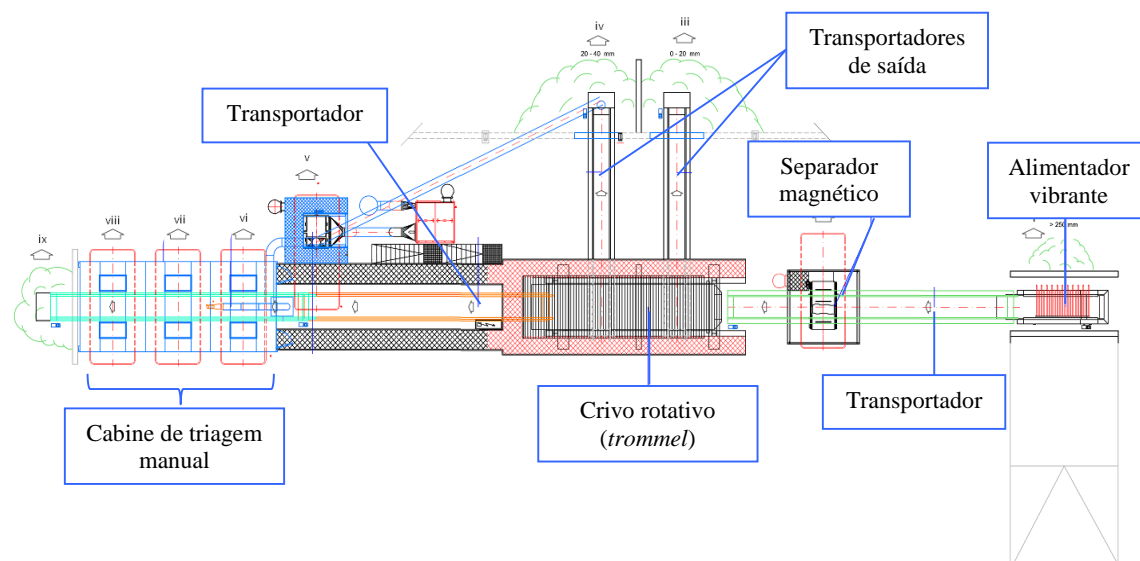


Figura 2.5 - Esquema ilustrativo do processo de triagem dos RCD da empresa SGR [SGR, 2011]

### **Aplicabilidade na construção**

Através de uma correta gestão, os RCD podem dar origem a soluções sustentáveis com vista na sua utilização para fabrico de materiais e aplicações na construção. As aplicações variam em função da oferta de materiais de construção, da disponibilidade de locais para deposição e do rigor da normalização aplicada [Pedrozo, 2008].

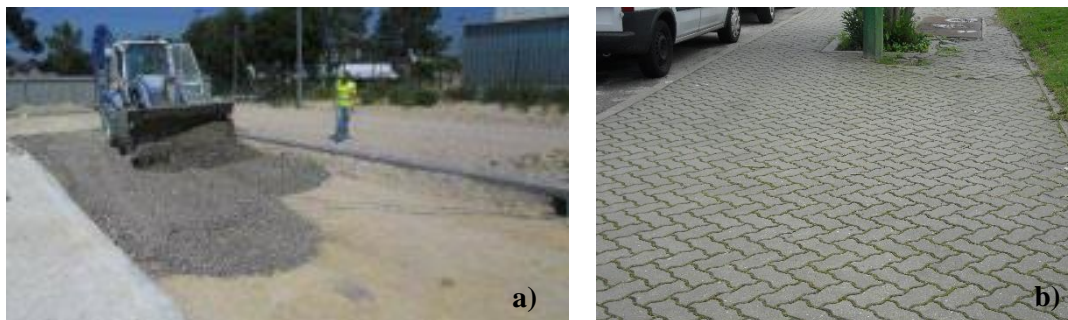
As propriedades físicas, mecânicas e químicas dos agregados reciclados provenientes de RCD e a sua viabilidade na incorporação de betões e argamassas, têm sido estudadas ao longo da última década, sendo que os resultados têm mostrado que é possível fazer tal substituição. Algumas normas europeias, como o Spanish Structural Concrete Code EHE-08 permitem a substituição parcial de agregados normalizados por agregados reciclados na produção de betões, como o caso de Espanha, que permite uma substituição até 20% em massa. No entanto, a maioria das normas não considera a substituição aceitável, devido à redução da resistência à compressão. Vários investigadores admitem que o agregado natural pode ser substituído num máximo de 30% em massa, sem afetar as propriedades mecânicas [Brito *et al*, 2013]. Deve ser sempre considerado as vantagens e inconvenientes relativamente a diferenças na composição, granulometria, absorção de água e outras características do agregado reciclado que traduzem em algumas propriedades com menor desempenho comparativamente com as argamassas de agregados naturais [Gonçalves, 2007].

A utilização de RCD em estradas portuguesas tem vindo a ser a forma mais simplista para escoar um grande volume de agregados grossos reciclados (com grau de heterogeneidade elevado). Não exigindo o mesmo controlo a nível granulométrico, os RCD têm vindo a ser muito utilizados em



aplicações com menor grau de exigência, como camadas bases e sub-bases de pavimentos rodoviários, figura 2.6 a), permitindo reduções importantes de custo [Brito *et al*, 2013].

Existem aplicações dos RCD em peças de betão não estrutural, como as utilizadas nos passeios para circulação dos peões, figura 2.6 b) ou em edifícios, sempre que não haja requisitos estruturais, como o caso do betão de limpeza, argamassas de regularização ou enchimento.



a) Pavimentação de estradas [Freire, 2013]; b) Passeios pedonais;

Figura 2.6 – Aplicações de RCD na construção

### **2.2.2. Adições Pozolânicas - Cinzas Volantes**

As pozolanas são materiais constituídos essencialmente por sílica e alumina, que apesar de não terem só por si propriedades aglomerantes hidráulicas, são capazes de se combinar com o hidróxido de cálcio, na presença de água, e formar compostos com propriedades aglomerantes semelhantes aos originados na hidratação dos constituintes do cimento. As pozolanas podem ser naturais, derivadas de rochas vulcânicas ou artificiais, depois de sujeitas a tratamentos térmico ou resultantes de subprodutos industriais da queima de produtos vegetais ou derivados dos processos de queima de combustíveis (caso das cinzas volantes) [Sousa-Coutinho, 1988; IPQ, 2010].

Na presente dissertação, importa aprofundar a incorporação de adições pozolânicas artificiais provenientes de subprodutos industriais no fabrico de argamassas.

A utilização do carvão na produção de eletricidade gera grandes quantidades de cinzas volantes. O carvão fornece cerca de 40% das necessidades de eletricidade do mundo, sendo a segunda fonte de energia primária no mundo, depois do petróleo. Assim, reconhecido o impacto ambiental da utilização das energias fósseis devido às emissões poluentes, é igualmente importante fazer a gestão dos produtos resultantes da sua queima. O carvão utilizado nas centrais apresenta, em média, um teor de cinzas que ultrapassa os 10%, traduzindo uma produção de centenas de milhares de toneladas de cinzas anuais [Vieira, 2012].

A atual produção anual de cinzas de carvão no mundo é estimada cerca de 600 milhões de toneladas, constituindo cerca de 75-80% da cinza total produzida. Assim, a quantidade de resíduos de carvão (cinzas), produzido nas fábricas e centrais termoelétricas tem vindo a aumentar, e a eliminação



dessa grande quantidade de cinzas volantes tornou-se um grave problema ambiental [Ahmaruzzaman, 2010].

Em Portugal, a produção de cinzas acontece nas centrais termoelétricas a carvão, localizadas em Sines e no Pego, figura 2.7.



a) Central termoelétrica de Sines [EDP, 2010]; b) Central termoelétrica do Pego [Pegop, 2011]

Figura 2.7 – Vista geral de centrais termoelétricas

Uma vez que as cinzas utilizadas na presente dissertação foram cedidas pela central termoelétrica do Pego, apresenta-se em seguida uma breve descrição do funcionamento desta central.

#### ***Breve caracterização da Central Termoelétrica do Pego***

A Central Termoelétrica do Pego, figura 2.8, localizada no concelho de Abrantes, é propriedade da empresa TEJO ENERGIA – Produção e Distribuição de Energia Elétrica, S.A. que detém a licença de exploração e o contrato de venda de energia com a Rede Elétrica Nacional (REN).

A operação e manutenção da central é da responsabilidade da PEGOP- Energia Elétrica, S.A., contendo o controlo da gestão das atividades de produção de eletricidade a partir da combustão de combustíveis fósseis, e a correspondente venda e deposição de cinzas e gesso [Pegop, 2011].



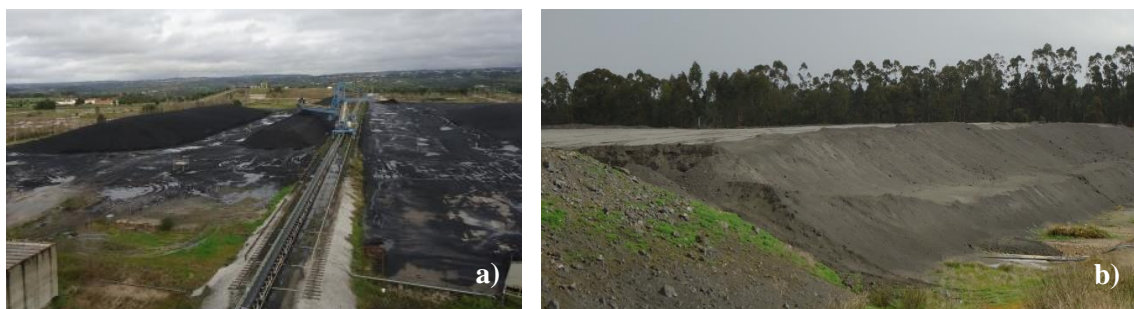
Figura 2.8 - Vista geral da Central termoelétrica do Pego

A energia elétrica gerada por uma central convencional, como a Central do Pego, é obtida a partir da combustão de um combustível (carvão). Provenientes de várias partes do mundo, cerca de 1300 toneladas de carvão são transportados diariamente, por via-férrea desde o porto de Sines até ao Pego. No parque do carvão, figura 2.9 a), efetua-se a compactação, resguardando as suas características durante mais tempo, e aspersão com água durante os meses de maior calor, evitando também a emissão de poeiras.

O carvão retirado do parque é transportado para os silos, que por sua vez, é conduzido através de tapetes até aos moinhos, onde é seco e reduzido a pó fino. O carvão pulverizado é queimado na câmara de combustão da caldeira, onde os gases quentes produzidos transmitem calor e a água que circula na caldeira aquece transformando-se em vapor de água. A turbina é acionada pelo vapor de água produzindo energia mecânica, que é transformada em energia elétrica através do gerador. A água volta ao estado líquido no condensador principal e volta a ser usada num novo ciclo de produção. A água utilizada para arrefecimento da turbina é captada no rio Tejo, a qual é restituída a este através da purga das torres de refrigeração, e a restante é libertada na atmosfera por evaporação.

No processo da queima do carvão, os gases produzidos da combustão, são aspirados pelos ventiladores, passando pelos precipitadores que retêm a quase totalidade das cinzas volantes. As cinzas coletadas pelos precipitadores e recolhidas nas tremonhas são transmitidas com ar comprimido para um silo intermédio e deste, para os silos principais com capacidade de 4000 toneladas até serem comercializadas [Pegop, 2011].

As várias normas (tabela 2.3) existentes relativas a cinzas volantes preconizam diferentes limites para determinados requisitos de conformidade, sendo apenas integradas na indústria da construção, aquelas que na sua constituição os respeitam (cinzas volantes conformes). Com efeito, as cinzas volantes são submetidas a programas experimentais, entre os quais, a calcinação, para controlo do teor de inqueimados, obtendo a quantidade de matéria volátil ou não volátil presente na amostra, ou seja, a quantificação de perda ao fogo (propriedade química) que define a percentagem de carbono livre (teor de inqueimados). Consequentemente, um considerável volume de cinzas que não cumpram os critérios de conformidade e, neste contexto, não podem ser comercializadas, (cinzas volantes não conformes) são depositadas em aterros junto às centrais, figura 2.9 b).



a) Parque do carvão; b) Aterro das cinzas

Figura 2.9 – Vista geral do armazenamento das cinzas e do carvão na central do Pego

Na figura 2.10 apresenta-se um esquema ilustrativo do processo de produção de energia através da queima do carvão.

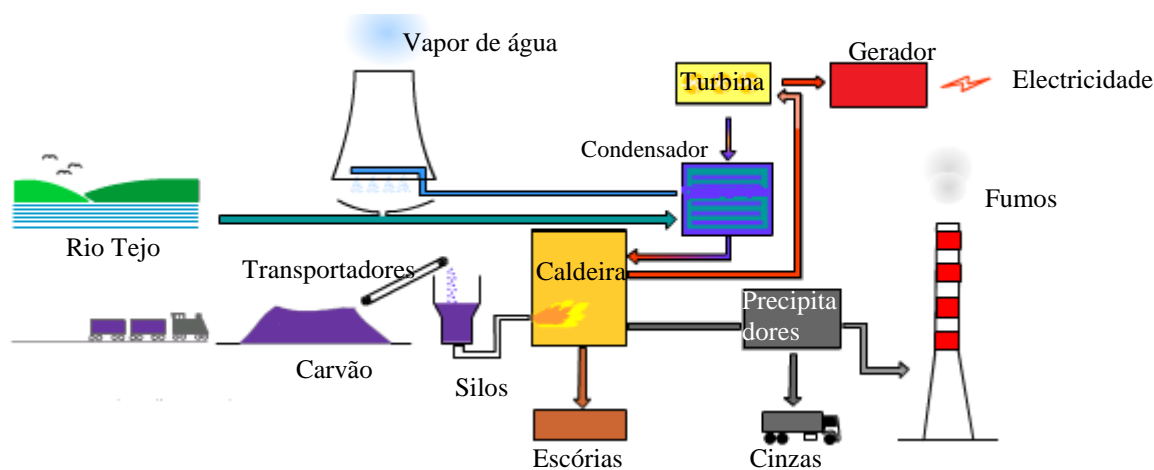


Figura 2.10 - Esquema ilustrativo do funcionamento da Central termoelétrica do Pego [TejoEnergia, 2013]

De forma análoga aos RCD, em seguida são descritas as principais características das cinzas volantes, a sua composição e classificação, normalização existente e as várias aplicações destes resíduos.

### Caracterização

As cinzas volantes, designação resultante da leveza das suas partículas, são subprodutos resultantes da combustão do carvão, que são arrastadas nos gases de combustão. Consistem num pó mineral fino de partículas de forma arredondada, com diâmetro médio de cerca de  $10\mu\text{m}$  que resulta da fusão e calcinação das impurezas minerais incombustíveis contidas no carvão queimado a altas temperaturas e pressões. As partículas das cinzas volantes apresentam uma forma esférica, sólida e oca, sendo essencialmente vítreas (cerca de 80%) com uma elevada finura [Sousa-Coutinho, 1988; IPQ, 2001; Aires, 2002].

A captação das cinzas volantes pode ser feita por coletores mecânicos, que recolhem as partículas de maiores dimensões, e através de precipitadores electrostáticos, que captam as partículas de menores dimensões, ou ainda por filtros de saco [Sousa-Coutinho, 1988].

As cinzas volantes utilizadas para o presente trabalho experimental recolhidas na central de Pego, foram captadas por precipitadores, como se esquematiza na figura 2.11, onde também são apresentados os vários tipos de cinzas originados pelo modo de captação.

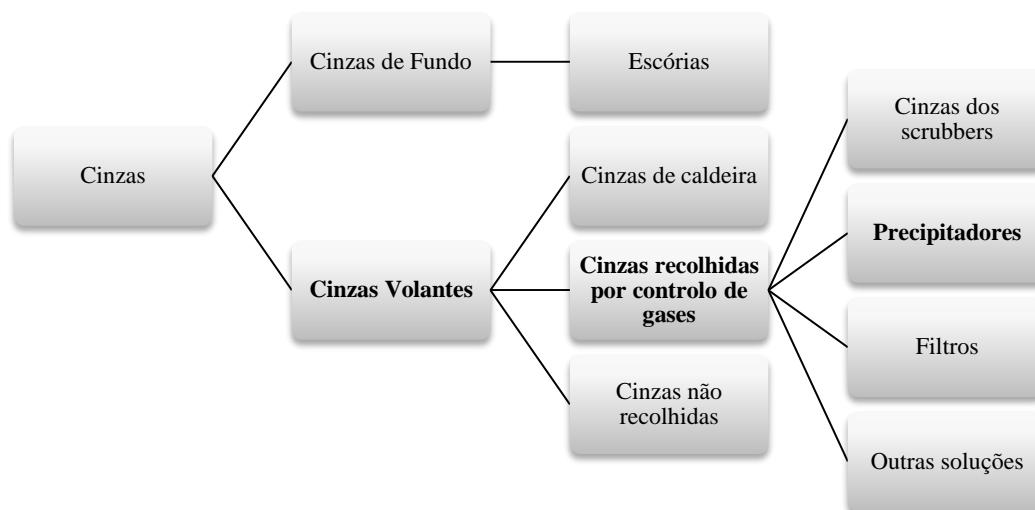


Figura 2.11 – Esquema ilustrativo dos diferentes modos de captação das cinzas

As cinzas volantes podem ser de natureza siliciosa, calcária ou silico-calcárias consoante a constituição química do carvão que as originam e o tipo de caldeira utilizado. As cinzas estudadas na presente dissertação, são de natureza siliciosa (apresentam na sua constituição maior percentagem de componentes siliciosos).

Segundo a NP EN 197-1 [IPQ, 2001] cinza volante siliciosa é um pó fino formado por partículas esféricas com propriedades pozolânicas, essencialmente constituído por:

- Dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ )
- Óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )
- Óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )
- Outros

Para uma melhor compreensão, é necessário conhecer o enquadramento legal das adições pozolânicas, nomeadamente o que diz respeito às leis do quadro legal nacional em vigor:

- NP 4220: 2010, Pozolanas para betão, argamassa e caldas – Definição, requisitos e verificação da conformidade;

- NP EN 197-1: 2001, Cimento – Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes;
- NP EN 450-1: 2012, Cinzas volantes para betão – Avaliação da conformidade

A composição química depende da quantidade de material mineral existente no carvão e das condições de combustão do carvão, visto que a quantidade de carvão por queimar existente nas cinzas é muito condicionante. O conteúdo em carbono livre (teor em inqueimados) das cinzas volantes é definido pelo grau de eficácia da combustão, sendo este um fator importante na determinação da qualidade das cinzas volantes, dado que em elevadas percentagens pode afetar negativamente o seu desempenho. O teor de inqueimados resultante de uma combustão incompleta do carvão inclui, além do carbono livre, perdas de água combinada e dióxido de carbono provenientes dos hidratos e dos carbonatos presentes nas cinzas volantes. O material inqueimado, caracterizado por partículas irregulares ou angulares com dimensões superiores à média, é responsável pelo elevado valor da superfície específica verificado na maioria das cinzas volantes. Como consequência, elevados teores de carbono implicam maior exigência de água, logo quanto maior for o teor de carbono das cinzas, menores serão as resistências mecânicas do betão [Aires, 2002]. O valor de teor de inqueimados, dado pela percentagem de perda ao fogo realizada para um tempo de calcinação de uma hora, deve respeitar os limites exigidos pela respetiva normalização, tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Limites de perda ao fogo exigidos pelas diferentes normas

Material	Categoria	Perda ao fogo [% em massa]	Norma
Cinzas para betão	A	< 5	NP EN 450-1:2012
	B	< 7	
	C	< 9	
Cimento corrente	-	5 a 7	NP EN 197-1: 2001
Pozolana	-	≤ 9	NP EN 4220: 2010

As cinzas comercializadas pela central do Pego destinam-se à indústria do betão, e a sua certificação tem por base a norma NP 450-1: 2012 - Cinzas volantes para betão.

Esta classificação define a conformidade das cinzas, ou seja, para teor de inqueimados superiores a 9% em massa, são denominadas cinzas não conformes, cinzas que não respeitam os requisitos exigidos na normalização. No entanto, a central do Pego apenas contém certificação até à categoria B, o que significa que as cinzas com teores de inqueimados superiores a 7% são consideradas não conformes.

No âmbito da presente dissertação, as cinzas são classificadas através dos limites impostos pelas normas NP 450-1:2012 e NP EN 197-1: 2001.

### ***Aplicabilidade***

Tendo presente as propriedades pozolânicas que as cinzas apresentam, a solução encontrada para o escoamento destes subprodutos compreende conciliar os interesses das indústrias de eletricidade e do cimento, tendo como objetivo o uso das cinzas para substituição parcial do cimento na produção de argamassas e no fabrico de betões. Em casos particulares, como o dos cimentos pozolânicos, esta incorporação pode chegar a 50%, conferindo características especiais aos betões. Além disso, as cinzas volantes também são empregues na indústria do betão pronto, como aditivo [Vieira, 2012].

A aplicação de cinzas volantes como pozolana para substituição parcial de cimento é essencialmente utilizada por razões económicas; todavia é de realçar os seus efeitos benéficos, tais como menor quantidade de água para a mesma trabalhabilidade, reduzido teor de ligante e menor calor de hidratação [Ahmaruzzaman, 2010].

O cimento Portland CEM IV/A (V) 32,5R – SR, constituído por 21% a 35% cinzas volantes, 65% a 79% clínquer Portland e 0% a 5% outros constituintes, é um cimento de alta resistência química utilizado no fabrico de betões e argamassas sujeitos a ambientes agressivos como também adequado para a realização de estruturas e peças de betão em grande massa, como barragens, figura 2.12 a) [Secil, 2013].

Este enquadramento permite que as cinzas volantes se encontrem ligadas a um conjunto de importantes obras públicas em Portugal e na Europa, como estádios de futebol, barragens, pontes, edifícios, entre outros. Além da indústria cimenteira, também na construção de estradas as cinzas volantes são aplicadas como material de enchimento nas camadas bases e sub-bases dos pavimentos, figura 2.12 b) [Vieira, 2012].



a) Construção de barragens [Cimpor, 2013]; b) Pavimentação de estradas [Boral, 2013]

Figura 2.12 – Aplicabilidade das cinzas

### 2.2.3. Ligante - Cimento

Os ligantes são produtos com propriedades de aglomerar os agregados e com o passar do tempo modificam a estrutura química e contribuindo para o endurecimento da pasta, coesão e resistência [Sousa-Coutinho, 1988].

Consoante o autor os ligantes podem ser classificados segundo a sua “hidraulicidade” em hidráulicos, aéreos e orgânicos, quanto à sua origem em orgânicos, minerais ou sintéticos, e ainda segundo a sua afinidade com a água, dividindo-se em hidrófilos e hidrófobos.

Os ligantes hidrófilos de origem mineral (essencialmente constituídos por pós finos que ao serem misturados com água fazem presa e endurecem) são os mais utilizados na construção civil. Esta categoria divide-se em dois grupos, ligantes aéreos, que endurecem unicamente com a presença do dióxido de carbono da atmosfera, caso da cal aérea, da argila e do gesso e os ligantes hidráulicos, que têm a propriedade de endurecer debaixo de água e de resistir à sua ação, caso das cals hidráulicas e do cimento [Margalha, 2010; Botas, 2009].

Na presente dissertação, o ligante utilizado é o cimento. O cimento é um ligante hidráulico que misturado com água forma uma pasta cujo endurecimento se dá pela reação química entre o pó e a água. O termo hidráulico dá-se à característica que estes materiais têm de endurecerem tanto ao ar como debaixo de água [Sousa-Coutinho, 1988].

O cimento Portland é obtido através de uma mistura de calcário (carbonato de cálcio), argila (silicatos) e outras substâncias ricas em sílica, alumina e ferro. Esta mistura é doseada para que cada componente tenha uma composição química dentro dos limites, após a evaporação da água [Sousa-Coutinho, 1988]:

- Óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ): 60 a 68%
- Dióxido de enxofre ( $\text{SiO}_2$ ): 17 a 25%
- Trióxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ): 2 a 9 %
- Trióxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ): 0,5 a 6%

Para fabricação do cimento é necessário explorar pedreiras de calcário, de onde são extraídos blocos deste material para posterior britagem, moagem e mistura com a argila. A matéria-prima depois de pré-homogeneizada (por via seca ou via húmida), o chamado cru, deve ser sujeita a análises químicas para que sejam feitas as correções e adições necessárias [Sousa-Coutinho, 1988].

O cru é transportado para os moinhos de bolas onde é moído e homogeneizado antes de entrar na linha de cozedura, para o seu pré aquecimento. Dentro do forno rotativo, a uma temperatura na ordem dos  $1450^\circ\text{C}$ , as matérias-primas reagem entre si formando novos compostos

(clinkerização). Após o seu arrefecimento, o clínquer é transportado para os moinhos de bolas, onde se fazem as adições necessárias para controlo de presa (gesso) e outros adjuvantes que modificam as propriedades, levando à formação dos principais componentes do cimento de Portland [Sousa-Coutinho, 1988]:

- Silicato tricálcico ( $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ): 20 a 65%
- Silicato bicálcico ( $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ): 10 a 55%
- Aluminato tricálcico ( $2\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ ): 0 a 15 %
- Aluminoferrato tetracálcico ( $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ ): 5 a 15 %

Os elementos finos produzidos, cimento, são encaminhados para os grandes silos são homogeneizados e daí distribuídos em sacos ou a granel.

#### **2.2.4. Água**

A água é essencial para a produção das argamassas, conferindo características aglomerantes aos ligantes hidrófilos, sendo responsável pela sua consistência no estado fresco e pelo processo de endurecimento. Deste modo, este parâmetro influencia certas propriedades e características de comportamento das argamassas, nomeadamente a porosidade e resistências mecânicas.

A quantidade de água utilizada na execução das argamassas é normalmente superior àquela que seria necessária para a sua obtenção, devido à necessidade de se ter uma determinada trabalhabilidade para se conseguir aplicar a argamassa. No entanto, a água em excesso dá origem a propriedades e características indesejadas, como a maior retração dos rebocos e diminuição da resistência a compressão [Botas, 2009; Pereira, 2008].

### **2.3. Trabalhos experimentais**

Referem-se em seguida alguns trabalhos de investigação cujo estudo incidiu em argamassas de cimento, com composições semelhantes às estudadas nesta dissertação. A compilação da presente pesquisa bibliográfica procura enquadrar o procedimento experimental adotado neste trabalho e, em simultâneo, servem como referência aos valores obtidos na presente campanha experimental.

Na tabela 2.4 encontram-se resumidos os autores, títulos e respetivas filiações dos trabalhos de investigação utilizados como referência.



Tabela 2.4 – Trabalhos experimentais de referência

Autor (es) e instituição	Trabalhos de investigação
P.Faria (2004), FCT-UNL	Argamassas de revestimento para alvenarias antigas: contribuição para o estudo da influência dos ligantes
M. Braga <i>et al</i> (2012), Elsevier	Incorporation of fine concrete aggregates in mortars
C. Neno (2010), Instituto Superior Técnico - Universidade de Lisboa	Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos provenientes da trituração do betão – integração de RCD
P.Torkittikul <i>et al</i> (2010), Elsevier	Utilization of ceramic waste as fine aggregate within Portland cement and fly ash concretes
J.Brito et al (2013), Elsevier	Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing
F.Lima (2005), Universidade Federal de Paraíba	Aproveitamento de resíduos de construção na fabricação de argamassas
I.Vegas et al (2009)	Design and performance of masonry mortars made with recycled concrete aggregates
C.Júnior (2011), Universidade Eduardo Mondlane, Faculdade de Ciências, Maputo	Estudo da influência do calcário cru e cinzas volantes nas propriedades físico-químicas e mecânicas do cimento Portland produzido em Moçambique
R.Pedrozo (2008), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis	Influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedades de argamassas e concretos
J.S.Siqueira et al (2012), Cerâmica	Reaproveitamento de cinzas de carvão mineral na formulação de argamassas
C.F. Christy et al (2010), Indian Journal of Engineering & Materials Sciences	Effect of Class-F fly ash as partial replacement with cement and fine aggregate in mortar

**FARIA, P. (2004) - Argamassas de revestimento para alvenarias antigas: contribuição para o estudo da influência dos ligantes, Tese de Doutorado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa**

Neste trabalho de investigação foram efetuados ensaios experimentais em provetes de várias argamassas, com o objetivo de avaliar a influência do tipo de ligante no comportamento das mesmas. Foram comparadas argamassas diversificadas (cal aérea, cimento e pré doseadas), produzidas a partir de diferentes preparações e tipos de cura, e cal área com adições pozolânicas.

Para a presente dissertação apenas serviu de referência a argamassa de cimento e areia produzida ao traço volumétrico 1:4, na qual foi utilizada cimento Portland tipo II de classe de resistência 32,5 N da marca Secil e areia de rio.

Primeiramente foram realizados ensaios de caracterização das matérias-primas utilizadas na preparação das argamassas, nomeadamente a determinação da baridade e granulometria.

Na tabela 2.5 apresentam-se os resultados dos ensaios preliminares de caracterização sobre os principais constituintes das argamassas produzidas.

Tabela 2.5 - Caracterização física dos materiais utilizados por P. Faria, 2004

	<b>Baridade<sup>1)</sup> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>D [mm]</b>	<b>d [mm]</b>	<b>MF</b>
Cimento	1590	-	-	-
Areia de rio	1280	2,38	0,297	2,7

<sup>1)</sup>Com compactação

As diferentes argamassas foram misturadas e compactadas em moldes prismáticos de 16cm×4cm×4cm. Previamente à moldagem dos provetes, foram estabelecidos valores médios de espalhamento de 71% para as argamassas de cimento. Após terem sido submetidos à cura, durante 60 dias, em ambiente seco com  $T=23\pm3^{\circ}\text{C}$  e  $Hr=50\pm5\%$ , foi efetuada a caracterização das argamassas endurecidas.

Na tabela 2.6 apresentam-se os principais resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização da 1ª fase experimental aos 60 dias de cura.

Tabela 2.6 - Resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas de cimento ensaiadas por P. Faria, 2004

<b>Características estudadas</b>		<b>Resultados</b>
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	9770
	Resistência à tração por flexão [MPa]	1,67
	Resistência à compressão [MPa]	6,49
Físicas	Massa volúmica aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	1881
	Porosidade aberta [%]	29
	Valor Assimptótico [kg/m <sup>2</sup> ] <sup>1)</sup>	18,7
	Coefficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ] <sup>1)</sup>	11,4

<sup>1)</sup>Ensaio realizado com meios provetes ( $\approx 8\text{cm} \times 4\text{cm} \times 4\text{cm}$ )

**BRAGA, M. et al (2012) - *Incorporation of fine concrete aggregates in mortars*, Construction and Building Materials, Elsevier**

M. Braga realizou argamassas com diferentes percentagens de incorporação de agregados finos provenientes da trituração de betão, avaliando a viabilidade da sua aplicação em argamassas de revestimento.

Na 1ª fase de investigação, foram considerados dois vetores distintos de investigação: a incorporação da fração mais fina dos agregados (granulometria inferior a 0,150) em 0%, 5%, 10% e 15% e a redução do teor de cimento em traços volumétricos 1:4, 1:5 e 1:6 com taxa de incorporação de agregados finos de betão determinada na primeira etapa.

Para a 2ª fase experimental a autora escolheu uma argamassa de cada vetor de investigação para a realização de ensaios de caracterização mais aprofundados das argamassas. A argamassa com 15% de finos de betão na sua constituição foi a que demonstrou melhor desempenho no primeiro vetor; e a argamassa com traço volúmico 1:5 para o segundo vetor.

As diferentes argamassas estudadas foram misturadas e compactadas em moldes prismáticos com dimensões de 16cm×4cm×4cm, moldes cilíndricos e moldes em tijolos.

Para comparação de valores obtidos na campanha experimental da presente dissertação, interessa referir apenas as argamassas do 1º vetor de investigação, nomeadamente as que apresentam composições com 15% de incorporação de agregado reciclados, I (15-1:4) e a argamassa de referência constituída por cimento e areia, I (0-1:4), produzidas ao traço volumétrico (1:4).

Foi utilizado o cimento Portland composto tipo CEM II – 32,5, areia proveniente do rio Tejo e agregados finos de betão produzidos por trituração de blocos de betão com resistência à compressão de 28,7 N aos 28 dias e separado pela granulometria pretendida.

Na tabela 2.7 apresentam-se os resultados dos ensaios preliminares de caracterização sobre os constituintes das argamassas produzidas, nomeadamente a determinação da baridade e granulometria.

Tabela 2.7 - Caracterização física dos materiais utilizados por M. Braga, 2010

	<b>Baridade [kg/m³]</b>	<b>D [mm]</b>	<b>d [mm]</b>
Cimento	1035	-	-
Areia de rio	1433	2,38	0,149
Finos de betão	842	2	0,063

Na tabela 2.8 apresentam-se os resultados do ensaio de espalhamento como também a quantidade de água necessária e a relação água/cimento.

Tabela 2.8 - Resultados dos ensaios no estado fresco das argamassas de cimento ensaiadas por M. Braga, 2010

Designação	Espalhamento	Relação a/l	Água necessária por dm <sup>3</sup> de argamassa (ml)
I (0-1:4)	71 %	1,41	220
I (15-1:4)	72 %	1,12	183

Na tabela 2.9 apresentam-se os resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização da 1ª fase experimental aos 28 dias de cura.

Tabela 2.9 - Resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas de cimento ensaiadas por M. Braga, 2010

Características estudadas		Resultados	
		I (0-1:4)	I (15-1:4)
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	7110	10620
	Resistência à tração por flexão [MPa]	1,36	2,71
	Resistência à compressão [MPa]	3,91	8,64
Físicas	Massa volúmica [kg/m <sup>3</sup> ] <sup>2)</sup>	1725,84	1814,46
	Coefficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ] <sup>1)</sup>	9,84	5,48

<sup>1)</sup>Ensaio realizado com meios provetes (≈ 8cm × 4cm × 4cm)

<sup>2)</sup>Ensaio realizado de acordo com a norma EN 1015-10 (1999)

Na tabela 2.10 apresentam-se os resultados do ensaio de aderência ao suporte obtidos na 2ª fase experimental aos 28 dias de cura.

Tabela 2.10 - Resultados médios obtidos no ensaio de aderência ao suporte obtidos por M. Braga, 2010

Designação	Tensão aderência ao suporte [MPa]	Desvio Padrão [MPa]	Tipologia de rotura
I (0-1:4)	0,33	0,11	Coesiva
I (15-1:4)	0,45	0,04	Adesiva

**NENO, Catarina (2010) – Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos provenientes da trituração do betão – integração de RCD. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa**

C.Neno desenvolveu o terceiro vetor que completa o estudo realizado por M. Braga [Braga, 2010] com a finalidade de avaliar o comportamento de argamassas com integração de resíduos de betão em substituição da areia natural.

A autora produziu quatro argamassas com taxas de substituição de 20%, 50% e 100% de areia natural pelos agregados finos reciclados de betão (granulometria inferior a 0,149 mm), assim como uma argamassa de referência sem agregados finos reciclados. Numa primeira fase foram realizados ensaios de identificação dos constituintes das argamassas e de caracterização das argamassas no estado fresco e endurecido, com o objetivo de comparar as suas prestações; em seguida, numa segunda fase de ensaios, foi escolhida a argamassa com a percentagem de substituição que melhor desempenho demonstrou e nesta foram realizadas análises mais aprofundadas com o objetivo de se obter uma caracterização mais precisa sobre o comportamento e a possibilidade da utilização dos agregados reciclados em argamassas de revestimento. As diferentes argamassas estudadas foram misturadas e compactadas em moldes prismáticos com dimensões de 16cm×4cm×4cm, moldes cilíndricos e moldes em tijolos. Foi utilizado cimento composto CEM II/B-L 32,5 N, areia proveniente do Rio Tejo e os resíduos de betão obtidos por trituração de blocos de betão C 30/37 através de uma britadeira, e separados por granulometrias.

Para comparação de valores obtidos na campanha experimental da presente dissertação, interessa referir apenas as argamassas que apresentam as composições com 50% e 100% de incorporação de agregado reciclado e a argamassa de referência constituída de cimento e areia (0%), produzidas ao traço volumétrico (1:4).

Na tabela 2.11 apresentam-se os resultados dos ensaios de identificação dos constituintes das argamassas.

Tabela 2.11 - Caracterização física dos materiais utilizados por C. Neno, 2010

<b>Material</b>	<b>Baridade [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>D [mm]</b>	<b>d [mm]</b>
Cimento	1035,4	-	-
Areia de rio	1432,5	-	-
Finos de betão	842	4,76	0,149

Na tabela 2.12 apresentam-se os resultados do ensaio de espalhamento como também a quantidade de água necessária e a relação água/cimento.

Tabela 2.12 - Resultados dos ensaios no estado fresco das argamassas de cimento ensaiadas por C. Neno, 2010

<b>Designação</b>	<b>Espalhamento</b>	<b>Relação a/l</b>	<b>Água necessária por dm<sup>3</sup> de argamassa (ml)</b>
0%	76 %	1,21	313,3
50%	78%	1,30	336,7
100%	70 %	1,27	330,0

Na tabela 2.13 apresentam-se os resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização aos 28 dias de cura.

Tabela 2.13 - Resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas de cimento ensaiadas por C. Neno, 2010

Características estudadas		Resultados		
		0%	50%	100%
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	7070	-	-
	Resistência à tração por flexão [MPa]	1,36	1,63	2,15
	Resistência à compressão [MPa]	3,91	5,15	7,38
Físicas	Massa volúmica [kg/m <sup>3</sup> ] <sup>2)</sup>	1725,84	1689,56	1569,51
	Coefficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ] <sup>1)</sup>	9,84	9,68	7,44

<sup>1)</sup>Ensaio realizado com meios provetes (  $\approx 8\text{cm} \times 4\text{cm} \times 4\text{cm}$  )

<sup>2)</sup>Ensaio realizado de acordo com a norma EN 1015-10 (1999)

Na tabela 2.14 apresentam-se os resultados do ensaio de aderência ao suporte obtidos na 2ª fase experimental aos 28 dias de cura.

Tabela 2.14 - Resultados médios obtidos no ensaio de aderência ao suporte por C. Neno, 2010

Designação	Tensão aderência ao suporte [MPa]	Desvio Padrão [MPa]	Tipologia de rotura
0%	0,33	0,11	Adesiva

**TORKITTIKUL, P. et al (2010) - *Utilization of ceramic waste as fine aggregate within Portland cement and fly ash concretes*, Cement & Concrete Composites, Elsevier**

O objetivo deste trabalho de pesquisa foi investigar a viabilidade da utilização de resíduos cerâmicos e cinzas volantes para produzir argamassas e betões. Os fragmentos cerâmicos foram obtidos a partir de resíduos da indústria local e posteriormente triturados e peneirados para produzir agregados finos.

De modo a investigar a potencial utilização de agregado de resíduos cerâmicos (CWA – ceramic waste aggregate) e cinzas volantes (FA – fly ash) como um substituto para areia e cimento Portland comum, respetivamente, os autores produziram 16 misturas (10 argamassas e 6 betões).

O autor produziu argamassas com a substituição da areia natural por agregados de resíduos cerâmicos em 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 100% em massa, mantendo constante a percentagem de cimento Portland e sem adição de cinzas volantes. Os autores consideraram uma

argamassa de referência, para comparação dos valores, constituída apenas por cimento Portland e areia.

Seguidamente nas restantes argamassas foi substituído 30% em massa de cimento Portland por cinzas volantes e a areia por agregados de resíduos cerâmicos em 0%, 50% e 100% em massa. As argamassas produzidas com relação água/ligante de 0,5 foram moldadas em moldes cúbicos de 50 mm e submetidas à cura dentro de água (cura húmida).

Foi utilizado Cimento Portland tipo I, areia natural e cinzas volantes produzidas a partir da queima de carvão lignite proveniente de uma fábrica de energia elétrica no norte da Tailândia.

No âmbito da presente dissertação apenas se consideraram o estudo em argamassas, nomeadamente as com substituição de 0%, 50% e 100% em massa da areia por agregados de resíduos cerâmicos e 100% e 70% de cimento Portland por cinzas volantes.

Na tabela 2.15 são apresentadas as constituições das argamassas que interessa referir para comparação com a presente dissertação.

Tabela 2.15 - Composição das argamassas estudadas por P. Torkittikul, 2010

<b>Designação</b>	<b>Cimento [% em massa]</b>	<b>Cinzas volantes [% em massa]</b>	<b>Areia</b>	<b>Agregados resíduos cerâmicos</b>
M0CWA0FA	100	0	100	0
M50CWA0FA	100	0	50	50
M100CWA0FA	100	0	0	100
M0CWA30FA	70	30	100	0
M50CWA30FA	70	30	50	50
M100CWA30FA	70	30	0	100

Na tabela 2.16 indicam-se os valores da máxima e mínima dimensão dos agregados utilizados.

Tabela 2.16 - Características dos agregados utilizados por P. Torkittikul, 2010

<b>Material</b>	<b>D [mm]</b>	<b>d [mm]</b>
Areia	3	0,30
Agregados de resíduos cerâmicos	3	0,30

Na tabela 2.17 apresentam-se os resultados médios obtidos nos ensaios de espalhamento das argamassas no estado fresco, e o de resistência à compressão no estado endurecido realizado aos 28 dias de cura.

Tabela 2.17 - Resultados médios obtidos nos ensaios realizados nas argamassas de cimento ensaiadas por P. Torkittikul, 2010

Designação	Espalhamento [%]	Resistência à compressão [MPa]
M0CWA0FA	100	42,2
M50CWA0FA	72	50,2
M100CWA0FA	60	45,8
M0CWA30FA	115	28,8
M50CWA30FA	87	35,5
M100CWA30FA	68	35,4

**BRITO, J. et al (2013) - *Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing*, Construction and Building Materials, Elsevier**

Este trabalho de investigação tem como objetivo avaliar o desempenho de argamassas produzidas com agregados cerâmicos provenientes de paredes divisórias.

Para tal foram produzidas 5 argamassas de cimento, ao traço volumétrico 1:7 com 0, 5, 10, 20, 40% de substituição de areia natural por agregados reciclados. A argamassa constituída apenas por areia natural siliciosa serve como argamassa de referência para efeitos de comparação com as restantes argamassas. As diferentes argamassas estudadas foram misturadas e compactadas em moldes prismáticos com dimensões de 16cm×4cm×4cm.

Para comparação de valores obtidos na campanha experimental da presente dissertação, interessa referir apenas a argamassa de referência (A-100/0) e a argamassa com uma substituição de 40 % de areia natural por agregados reciclados (E-60/40).

Foi utilizado cimento comercial do tipo CEM IV/A (V) 32.5 N e areia natural siliciosa na produção das argamassas.

Na tabela 2.18 apresentam-se os resultados dos ensaios de identificação dos constituintes das argamassas.

Tabela 2.18 – Características dos materiais utilizados por J. Brito, 2013

Material	Baridade [kg/m <sup>3</sup> ]	D [mm]	d [mm]
Cimento	2830	-	-
Areia natural	2630	2,5	0,1
Agregados reciclados	2140	3,1	0,07

Na tabela 2.19 indicam-se os resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas no estado endurecido realizado aos 28 dias de cura.



Tabela 2.19 - Resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas de cimento ensaiadas por J. Brito, 2013

Características estudadas		Resultados	
		A-100/0	E-60/40
Mecânicas	Resistência à tração por flexão [MPa]	2,4	2,6
	Resistência à compressão [MPa]	7,1	7,5
Físicas	Coeficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ] <sup>1</sup>	6,20	6,51

<sup>1</sup>Ensaio realizado com meios provetes (  $\approx 8\text{cm} \times 4\text{cm} \times 4\text{cm}$  )

Na tabela 2.20 apresentam-se os resultados do ensaio de aderência ao suporte obtidos na 2ª fase experimental aos 28 dias de cura.

Tabela 2.20 - Resultados médios obtidos no ensaio de aderência ao suporte por J. Brito, 2013

Designação	Tensão aderência ao suporte [MPa]	Desvio Padrão [MPa]
A – 100/0	0,38	0,06
E – 60/40	0,44	0,08

**LIMA, F (2005) – *Aproveitamento de resíduos de construção na fabricação de argamassas*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Paraíba**

O objetivo deste trabalho é estudar a viabilidade técnica do uso de resíduos produzidos pela construção civil, na produção de argamassas de assentamento e de revestimento.

Em laboratório, foi preparado, através de trituração dos resíduos compostos por tijolos e argamassas, um agregado reciclado artificial devidamente caracterizado. O autor produziu diversas argamassas (cal e cimento) com substituição da areia natural por agregados reciclados nas proporções volumétricas de 10%, 25%, 50%, 75% e 100%. Para se verificar o desempenho do agregado reciclado foram realizados diversos traços: 1:1, 1:2, 1:3 e 1:4, com agregado natural e 100% de agregado reciclado. Para a presente dissertação interessa apenas referir as argamassas constituídas por agregado natural (REF), agregado reciclado (REC) com cimento, produzidas ao traço volumétrico 1:3.

Foi utilizado cimento Portland do tipo CP II – Z – 32 da marca Poty e areia natural de rio quartzosa, na produção das argamassas.

Na tabela 2.21 apresentam-se os resultados dos ensaios de identificação dos constituintes das argamassas.

Tabela 2.21 – Características dos materiais utilizados por F. Lima, 2005

<b>Material</b>	<b>Baridade [kg/m³]</b>	<b>D [mm]</b>	<b>MF</b>
Agregado natural	1660	4,8	2,02
Agregado reciclado	1230	4,8	2,45

Na tabela 2.22 apresentam-se os resultados médios obtidos nos ensaios de resistência à compressão no estado endurecido realizado aos 28 dias de cura, assim como a relação água/ligante utilizada em cada argamassa.

Tabela 2.22 - Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas de cimento ensaiadas por F. Lima, 2005

<b>Designação</b>	<b>a/l</b>	<b>Resistência à compressão [MPa]</b>
REF	0,74	22,2
REC	0,87	13,7

**VEGAS, I. et al (2009) - *Design and performance of masonry mortars made with recycled concrete aggregates*, Materiales de Construcción**

Este estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica de utilização da fração mais fina de agregados reciclados provenientes de entulho de betão, para a fabricação de argamassa de cimento. Os agregados reciclados foram triturados e peneirados de forma a eliminar as partículas com dimensão superior a 5 mm. Seis amostras de betão foram selecionadas e recolhidas em diferentes momentos, resultando em seis tipos diferentes de agregados, identificados como FRH-i (com i a variar entre 1 a 6). A autora escolheu uma das seis amostras de agregados, a FRH-6 para a produção das argamassas; e nestas variou a percentagem de substituição de areia natural por agregado reciclado. Foram usadas diferentes percentagens de substituição, e as amostras denominadas por conseguinte, a partir de C100/0 indicando a 100 % de areia natural, a C 0/100, para argamassas com 100% de substituição da areia natural por agregado reciclado. As argamassas foram produzidas com teores de água que asseguraram uma consistência semelhante em todos os casos.

As diferentes argamassas estudadas foram misturadas e compactadas em moldes prismáticos com dimensões de 16cm×4cm×4cm.

Foi utilizado cimento do tipo CEM II/B-M (V-S-LL) 42,5 R e areia calcária na produção das argamassas.

Na tabela 2.23 é apresentado o valor da baridade dos agregados utilizados na produção das argamassas.

Tabela 2.23 – Baridade dos agregados utilizados por I. Vegas, 2009

Baridade [kg/m <sup>3</sup> ]	
FRH - 6	2200
FN – areia natural	2670

Na tabela 2.24 apresentam-se os resultados médios obtidos nos ensaios de espalhamento das argamassas no estado fresco, e o de resistência à compressão no estado endurecido realizados aos 28 dias de cura.

Tabela 2.24 - Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas de cimento ensaiadas por I. Vegas, 2009

Designação	Espalhamento [%]	Resistência à compressão [MPa]	Resistência à flexão [MPa]
C100/0	81	13,92	3,6
C50/50	82	5,11	1,44
C0/100	73	2,13	0,64

**JÚNIOR, C. (2011) - *Estudo da influência do calcário cru e cinzas volantes nas propriedades físico-químicas e mecânicas do cimento Portland produzido em Moçambique*, Universidade Eduardo Mondlane, Faculdade de Ciências, Maputo**

Este estudo tem como objetivo estudar a influência substituição do cimento Portland por calcário cru e cinzas volantes em argamassas. Para tal o autor produziu diversas composições de argamassas, ao traço volumétrico 1:3, utilizando cimento, cinzas volantes e calcário. Foram avaliadas as propriedades físico-químicas e mecânicas das diferentes argamassas, onde foi realizado uma substituição parcial do cimento por cinzas volantes, e por calcário cru.

Para a presente dissertação apenas interessa referir os valores obtidos pelas argamassas com a substituição das cinzas volantes de 25% de substituição do cimento por cinzas (CP25CV), a de 30% (CP30CV) e a de referência (CP100).

Foi utilizado agregado normalizado e o cimento foi fabricado pelo autor através da britagem e moagem das matérias-primas (clínquer, gesso e cinzas volantes). As cinzas volantes foram obtidas partir da queima do carvão numa central termoelétrica.

As diferentes argamassas estudadas foram misturadas e compactadas em moldes prismáticos com dimensões de 16cm×4cm×4cm.

Na tabela 2.25 são apresentados os valores da relação água/ligante e ainda os resultados médios obtidos nos ensaios de resistência à flexão e à compressão no estado endurecido realizados aos 28 dias de cura.

Tabela 2.25 - Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas de cimento ensaiadas por C. Júnior, 2011

Argamassas	a/l	Resistência à tração por flexão [MPa]	Resistência à compressão [MPa]
CP100	4,0	9,0	54,8
CP25CV	3,8	8,5	45,3
CP30CV	3,7	8,3	46,1

**PEDROZO, R. (2008) - *Influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedades de argamassas e concreto*, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis**

Este trabalho foi desenvolvido com objetivo de avaliar a influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em betões e argamassas. Para este efeito foram produzidos betões e argamassas com teores de substituição de 0%, 25%, 50%, 75%, 100% do agregado fino natural pelo agregado fino reciclado. As argamassas foram produzidas ao traço volumétrico 1:3 e foi considerada uma relação água/ligante de 0,60 para betões e 0,66 para as argamassas. As diferentes argamassas estudadas foram misturadas e compactadas em moldes prismáticos com dimensões de 16cm×4cm×4cm, e colocados durante 28 dias num ambiente de cura condicionado a  $T = 24 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $HR = 55\%$ .

O autor empregou RCD a bruto e calcinados a 600 e 800°C, no entanto, no âmbito da presente dissertação apenas se consideram as argamassas produzidas com RCD a bruto, denominadas M1. Foi utilizado cimento do tipo CP II-F da marca Itambé, e areia natural quartzosa para as argamassas de referência. Para a presente dissertação interessa referir os resultados das argamassas com substituições de 0% (argamassa de referência), 50% e 100%.

Na tabela 2.26 apresentam-se os resultados dos ensaios de identificação dos constituintes das argamassas.

Tabela 2.26 – Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados utilizados por R. Pedrozo, 2008

Material	Baridade [ $\text{kg/m}^3$ ]	D [mm]	d [mm]	MF
Areia natural	2614	4,8	0,15	3,17
Agregado fino reciclado	2515	4,8	0,15	2,40

Na tabela 2.27 apresentam-se os resultados médios obtidos nos ensaios de espalhamento das argamassas no estado fresco e o de resistência à compressão no estado endurecido realizado aos 28 dias de cura.

Tabela 2.27 - Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas de cimento ensaiadas por R. Pedrozo, 2008

Designação	Espalhamento <sup>1)</sup> [%]	Resistência à compressão [MPa]	Resistência à flexão [MPa]
REF	200	25,4	6,2
50M1	125	22,5	7,2
100M1	100	23,0	8,0

<sup>1)</sup>Utilização de um tipo de equipamento diferente do utilizado na presente dissertação

**SIQUEIRA, J.S. et al (2012) – *Reaproveitamento de cinzas de carvão mineral na formulação de argamassas, Cerâmica***

Este trabalho tem como objetivo o estudo da incorporação de cinzas, provenientes da combustão do carvão mineral em caldeiras de leito fluidizado, em substituição parcial do cimento na produção de argamassas. Para esse efeito foram produzidas argamassas ao traço volumétrico 1:4 com a inserção de cinzas nas proporções 0, 10, 20, 30, 40 e 50%. As argamassas foram compactadas e moldadas em moldes metálicos cilíndricos de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura.

Foi utilizado cimento Portland tipo CP II E32 da marca Poty e areia siliciosa comercializada na região de Belém, que foi previamente peneirada e utilizado apenas o material de dimensão inferior à malha #100. As cinzas utilizadas nesta pesquisa são provenientes da queima do carvão de uma empresa refinadora de alumina do estado do Pará. A argamassa sem adição de cinzas é considerada como a argamassa de referência para comparação com as restantes, e para todas as argamassas foi definida uma relação água/ ligante de 0,8. Para a presente dissertação interessa apenas referir as argamassas de referência (REF) e as argamassas com substituição de 10 e 20 %, sendo que estas são as que se aproximam da substituição utilizada no presente trabalho experimental.

Na tabela 2.28 apresentam-se os resultados médios obtidos no ensaio de resistência à compressão no estado endurecido realizado aos 28 dias de cura.

Tabela 2.28 - Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas de cimento ensaiadas por J. Siqueira, 2012

Designação	Resistência à compressão [MPa]
REF	13,8
10%	11
20%	8,4

**Christy, C.F. et al (2010) - *Effect of Class-F fly ash as partial replacement with cement and fine aggregate in mortar*, Indian Journal of Engineering & Materials Sciences**

Este trabalho tem como objetivo o estudo da substituição de cimento e agregado fino por de cinzas volantes de classe F (cinzas siliciosas), provenientes da combustão do carvão de uma central termoeletrica em Mettur, India. Para esse efeito foram produzidas argamassas com traços volumétricos 1:3, 1:4,5 e 1:6 (ligante: agregado) com a substituição do cimento por cinzas nas proporções 0, 10, 20, 25 e 30% e de agregado fino (areia) por cinzas em proporções de 20% e 30%. As argamassas foram compactadas e moldadas em moldes cúbicos de com 7,07cm×7,07cm×7,07cm.

As argamassas sem substituições (0%) são consideradas as argamassas de referência para comparação dos valores dos ensaios realizados.

Para a presente dissertação apenas interessa referir as argamassas com substituição de cimento por cinzas em proporções de 0% (REF), 10% e 20%.

Na tabela 2.29 apresentam-se os resultados médios obtidos no ensaio de resistência à compressão no estado endurecido realizado aos 28 dias de cura.

Tabela 2.29 - Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas de cimento ensaiadas por C. Christy, 2010

Designação	Resistência à compressão [MPa]
REF	20
10%	27,5
20%	26

## **2.4. Linha de investigação no âmbito da incorporação de RCD e cinzas volantes não conformes em argamassas**

Nesta secção são apresentados os trabalhos de investigação desenvolvidos no âmbito do reaproveitamento de resíduos na produção de argamassas, realizados como resposta ao pedido da empresa SGR e da central termoeletrica do Pego. Estes trabalhos servem para a realização de uma análise qualitativa, apresentada no capítulo 5.

Nesta linha de investigação estão inseridos a presente dissertação e os trabalhos apresentados na tabela 2.30, que têm como diretriz comum a incorporação de resíduos, nomeadamente dos RCD e cinzas volantes, na produção de argamassas. Esta linha de investigação foi iniciada pelo trabalho de Ana Barra, que estudou a influência de RCD em argamassas de cimento; os restantes três trabalhos realizados por Rita Santos, Ana Mana e Raquel Frutuoso são realizados em argamassas de cal aérea.

Tabela 2.30 - Trabalhos experimentais inseridos na linha de investigação

<b>Autor (es) e instituição</b>	<b>Trabalhos de investigação</b>
A.Barra (2011) – FCT-UNL	Caracterização física e mecânica de argamassas não estruturais com agregados finos reciclados
A.Mana (2013) – FCT-UNL	Influência das cinzas volantes não conformes em argamassas de cal aérea
R.Santos (2013) – FCT-UNL	Influência de agregados reciclados provenientes de RCD no desempenho de argamassas de cal aérea
R.Frutuoso (2013) – FCT-UNL	Influência de agregados provenientes de RCD e cinzas volantes não conformes em argamassas de cal aérea

***BARRA, Ana (2011) – Caracterização física e mecânica de argamassas não estruturais com agregados finos reciclados. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova, Lisboa.***

A autora produziu argamassas com agregados finos reciclados provenientes de RCD, avaliando a viabilidade da reutilização dos RCD no processo construtivo, nomeadamente em argamassas cuja aplicação não obrigue a exigências estruturais, como argamassas de revestimento. Neste trabalho a autora produziu duas argamassas com agregados reciclados. Uma das argamassas tem como ligante a cal aérea e outra o cimento. Estas foram comparadas com outras duas argamassas homólogas, mas com agregados finos normalizados.

As diferentes argamassas estudadas foram misturadas e compactadas em moldes prismáticos com dimensões de 16cm×4cm×4cm e moldes em tijolos. Foi utilizado cimento composto CEM II/B-L 32,5N da Secil, cal aérea hidratada Lusical e areia normalizada. Os RCD utilizados foram recolhidos pela autora numa empresa (SGR - Sociedade Gestora de Resíduos SA) especializada na triagem e recuperação destes resíduos.

Para comparação de valores obtidos na campanha experimental da presente dissertação, serviram de referência apenas as argamassas com as composições de cimento e agregado normalizado ao traço volumétrico 1:4 (NCi) e cimento com agregado reciclado ao traço volumétrico 1:4 (RCi).

Na tabela 2.31 apresentam-se os resultados dos ensaios de identificação dos constituintes das argamassas.

Tabela 2.31 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados utilizados por A. Barra, 2011

<b>Material</b>	<b>Baridade [kg/m³]</b>	<b>MF</b>	<b>D[mm]</b>	<b>d [mm]</b>
Cimento	951,8	-	-	-
Agregado normalizado	1556,8	2,2	1,19	0,149
Agregado reciclado	1322,9	3,2	12,7	0,075

Na tabela 2.32 apresentam-se os resultados do ensaio de espalhamento como também a quantidade de água necessária e a relação água/cimento.

Tabela 2.32 - Resultados dos ensaios no estado fresco das argamassas de cimento ensaiadas por A.Barra, 2011

<b>Designação</b>	<b>Espalhamento</b>	<b>Relação a/l</b>	<b>Água necessária por dm<sup>3</sup> de argamassa (ml)</b>
NCi	68,8 %	0,94	178
RCi	72,0%	1,16	220

Na tabela 2.33 apresentam-se os principais resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização aos 28 dias de cura.

Tabela 2.33 - Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas de cimento ensaiadas por A. Barra, 2011

<b>Características estudadas</b>		<b>Resultados</b>	
		NCi	RCi
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	9485	3351
	Resistência à tração por flexão [MPa]	1,42	0,64
	Resistência à compressão [MPa]	4,04	2,81
Físicas	Massa volúmica real [kg/m <sup>3</sup> ]	2644,1	1978,3
	Massa volúmica aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	1978,3	1689,9
	Porosidade aberta	25,2	35,6
	Valor assíntótico [kg/m <sup>2</sup> ]	15,15	21,65
	Coefficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ]	11,09	11,51

Na tabela 2.34 apresentam-se os resultados do ensaio de aderência ao suporte obtidos na 2ª fase experimental aos 28 dias de cura:

Tabela 2.34 - Resultados do ensaio de aderência ao suporte realizado por A.Barra, 2011

<b>Designação</b>	<b>Tensão aderência ao suporte [MPa]</b>	<b>Tipologia de rotura</b>
RCi	0,18	Adesiva
NCi	0,34	Adesiva



**MANA, Ana (2013) – *Influência das cinzas volantes não conformes em argamassas de cal aérea***  
**Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa.**

Este trabalho visa estudar a influência das cinzas volantes não conformes em argamassas de cal aérea avaliando assim a viabilidade da reutilização destes resíduos industriais no processo construtivo, nomeadamente em argamassas.

A autora produziu cinco argamassas de cal aérea e agregado fino normalizado, produzidas ao traço volumétrico 1:3 (ligante: agregado), diferenciando na quantidade de ligante que é substituído, nas mesmas percentagens, por cinzas volantes conformes ou não conformes. As argamassas, numeradas de A0 a A4: uma argamassa de referência (sem cinzas volantes), duas argamassas com cinzas volantes conformes nas proporções de 1/6 e 2/6 em relação ao volume do ligante e mais duas argamassas com cinzas volantes não conformes, nas mesmas percentagens das cinzas volantes conformes.

As diferentes argamassas estudadas foram misturadas e compactadas em moldes prismáticos com dimensões de 16cm×4cm×4cm e moldes em tijolos. Foi utilizado cal área hidratada Lusical e areia normalizada e cinzas volantes fornecidas pela Central termoelétrica do Pego.

Para comparação de valores obtidos na campanha experimental da presente dissertação, servira de referência apenas as argamassas com as substituições de 1/6 de cinzas volantes conformes (A1) e não conformes (A3) e a argamassa de referência (A0).

Em seguida, tabela 2.35, são apresentados os resultados obtidos dos ensaios de identificação das cinzas volantes e do agregado utilizado.

Tabela 2.35 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados utilizados por A.Mana, 2013

<b>Material</b>	<b>Baridade [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>MF</b>	<b>D[mm]</b>	<b>d [mm]</b>
Cinzas volantes conformes	949,8	-	-	-
Cinzas volantes não conformes	772,6	-	-	-
Agregados finos normalizados	1627,0	3,36	1,19	0,075

Na tabela 2.36 apresentam-se os resultados do ensaio de espalhamento como também a quantidade de água necessária e a relação água/cimento.

Tabela 2.36 - Resultados dos ensaios no estado fresco das argamassas de cal aérea ensaiadas por A.Mana, 2013

Argamassas	Espalhamento [%]	Relação a/l	Água necessária por dm <sup>3</sup> de argamassa (ml)
A0	66,3	0,93	980
A1	74,3	0,97	850
A3	73,0	0,97	850

Na tabela 2.37 apresentam-se os principais resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização aos 90 dias de cura.

Tabela 2.37 - Resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas de cal aérea ensaiadas por A.Mana, 2013

Características estudadas		Resultados		
		A0	A1	A3
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	3318,3	7405,0	5594,9
	Resistência à tração por flexão [MPa]	0,2	0,7	0,5
	Resistência à compressão [MPa]	0,9	1,1	0,9
Físicas	Massa Volúmica Real [kg/m <sup>3</sup> ]	2400,4	2429,7	2415,3
	Massa Volúmica Aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	1880,2	2429,7	2072,9
	Porosidade Aberta [%]	21,7	19,5	14,1
	Valor assintótico [kg/m <sup>2</sup> ] <sup>1)</sup>	28,00	25,72	27,92
	Taxa de secagem [kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ] <sup>1)</sup>	1,04	0,79	1,09
	Índice de secagem [-] <sup>1)</sup>	0,28	0,31	0,37
	Coefficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ] <sup>1)</sup>	12,02	9,65	11,97

<sup>1)</sup>Ensaio realizado com meios provetes ( 16cm × 4cm × 4cm)

**SANTOS, Rita (2013) – *Influência de agregados reciclados provenientes de RCD no desempenho de argamassas de cal aérea*, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa.**

Este trabalho experimental visa avaliar o comportamento de argamassas de cal aérea com incorporação de agregado reciclado proveniente de RCD, determinando a influência do tipo de RCD mencionado em substituição da areia.

A autora produziu cinco argamassas com taxas de substituição de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% de areia normalizada pelos agregados finos reciclados, sendo a argamassa constituída apenas por agregado fino normalizado a argamassa de referência.

Todas as argamassas foram produzidas a um traço volumétrico 1:3 (ligante: agregado), misturadas e compactadas em moldes prismáticos com dimensões de 16cm×4cm×4cm e moldes em tijolos. Foi

utilizado cal área hidratada Lusical, areia normalizada e os agregados finos reciclados recolhidos pela autora na empresa (SGR - Sociedade Gestora de Resíduos SA) especializada na triagem e recuperação destes resíduos.

Para comparação de valores obtidos na campanha experimental da presente dissertação, serviram de referência, apenas as argamassas com as composições de 0% e 100%, denominadas 100N0R e 0N100R respetivamente.

Na, tabela 2.38, são apresentados os resultados obtidos dos ensaios de identificação dos agregados utilizados.

Tabela 2.38 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados utilizados por R.Santos, 2013

Material	Baridade [kg/m <sup>3</sup> ]	MF	D[mm]	d [mm]
Agregados finos normalizados	1627	3,36	2,38	0,075
Agregados finos reciclados	1242,6	4,26	19,1	0,075

Na tabela 2.39 apresentam-se os resultados do ensaio de espalhamento como também a quantidade de água necessária e a relação água/cimento.

Tabela 2.39 - Resultados dos ensaios no estado fresco das argamassas de cal aérea ensaiadas por R. Santos, 2013

Designação	Espalhamento [%]	Relação a/l	Água necessária por dm <sup>3</sup> de argamassa (ml)
100N0R	75,75	3,0	930
0N100R	63,5	3,3	1010

Na tabela 2.40 apresentam-se os principais resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização aos 90 dias de cura.

Tabela 2.40 - Resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas de cal aérea ensaiadas por R. Santos, 2013

Características estudadas		Resultados	
		100N0R	0N100R
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	2587,4	1308,7
	Resistência à tração por flexão [MPa]	0,4	0,6
	Resistência à compressão [MPa]	0,9	1,7
Físicas	Massa Volúmica Real [kg/m <sup>3</sup> ]	2279,9	2418,4
	Massa Volúmica Aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	1894,0	1719,6
	Porosidade Aberta [%]	16,9	29,9

Tabela 2.40 - Continuação

Características estudadas	Resultados	
	100N0R	0N100R
Taxa de secagem [ $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ ] <sup>1)</sup>	0,711	1,302
Índice de secagem [-] <sup>1)</sup>	0,005	0,013
Valor assintótico <sup>1)</sup>	14,3	22,5
Coefficiente de absorção de água por capilaridade [ $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ ] <sup>1)</sup>	12,1	9,2

<sup>1)</sup>Ensaio realizado com meios provetes ( $\approx 8\text{cm} \times 4\text{cm} \times 4\text{cm}$ )

**FRUTUOSO, Raquel (2013) – *Influência de agregados provenientes de RCD e cinzas volantes não conformes em argamassas de cal aérea*, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa.**

R. Frutuoso (2013) produziu argamassas com incorporação de agregados finos reciclados provenientes de RCD e cinzas volantes não conformes, avaliando a viabilidade da reutilização destes resíduos no processo construtivo.

A autora produziu 10 argamassas de cal aérea com agregado fino normalizado, com agregado fino reciclado bem como uma combinação entre os dois tipos de agregados. Para efeitos de comparação, 2 das argamassas produzidas são argamassas de referência, sem qualquer adição pozolânica; nas restantes argamassas procedeu-se à substituição de 1/6 do volume de cal aérea por cinzas volantes conformes e não conformes. Além destas, foi necessário produzir-se duas argamassas devido a um problema de presa instantânea, que consumiu quase todo o agregado, com a introdução de um adjuvante retardador de presa em 1% da massa do ligante e o agregado remanescente (fase 2).

As argamassas foram produzidas ao traço volumétrico 1: 3 (ligante: agregado) ou 1: 0,2: 3,6 (ligante: cinzas: agregado), sendo misturadas e compactadas em moldes prismáticos com dimensões de 16cm×4cm×4cm e moldes em tijolos.

Foi utilizado cal área hidratada Lusical, areia normalizada, agregados finos reciclados recolhidos pela autora na empresa SGR e cinzas volantes fornecidas pela Central termoelétrica do Pego.

Em seguida, tabela 2.41, são apresentados os resultados obtidos dos ensaios de identificação dos agregados utilizados e das cinzas volantes.

Tabela 2.41 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados utilizados por R. Frutuoso, 2013

Material	Baridade [kg/m <sup>3</sup> ]	MF	D [mm]	d [mm]
Cinzas volantes conformes	1114,03	-	-	-
Cinzas volantes não conformes	1027,16	-	-	-
Agregados finos normalizados	1592,44	2,3	1,19	0,075
Agregados finos reciclados (fase 1)	1082,46	3,6	9,52	0,075

Na tabela 2.42 apresentam-se os resultados do ensaio de espalhamento como também a relação água/cimento.

Tabela 2.42 - Resultados dos ensaios no estado fresco das argamassas de cal aérea ensaiadas por R. Frutuoso, 2013

Argamassas	Espalhamento [%]	Relação a/l
A0	175,3	2,47
A1	165,0	2,60
A2	169,0	1,37
A3	167,8	1,75
A4	167,5	3,36
A5	167,8	3,20

Nas tabelas 2.43 e 2.44 apresentam-se os principais resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização aos 90 dias de cura.

Tabela 2.43 - Resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas de cal aérea com agregados reciclados ensaiadas por R. Frutuoso, 2013

Características estudadas		Resultados		
		A1	A4	A5
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	4525,40	2647,79	2402,67
	Resistência à tração por flexão [MPa]	0,42	0,46	0,50
	Resistência à compressão [MPa]	1,58	1,51	1,71
	Massa Volúmica Real [kg/m <sup>3</sup> ]	2304,53	2383,52	2357,51
	Massa Volúmica Aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	1580,83	1582,53	1570,68
	Porosidade Aberta [%]	31,44	33,61	33,38
	Taxa de secagem [kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ] <sup>1)</sup>	0,50	0,42	0,33
	Índice de secagem [-] <sup>1)</sup>	0,17	0,19	0,20
	Valor assintótico [kg/m <sup>2</sup> ] <sup>1)</sup>	26,45	27,42	26,34
	Coefficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ] <sup>1)</sup>	15,26	15,23	16,91

<sup>1)</sup>Ensaio realizado com meios provetes (≈ 8cm × 4cm × 4cm)

Tabela 2.44 - Resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas de cal aérea com agregados normalizados ensaiadas por R. Frutuoso, 2013

Características estudadas		Resultados		
		A0	A2	A3
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	4525,40	5965,08	4260,00
	Resistência à tração por flexão [MPa]	0,35	0,60	0,31
	Resistência à compressão [MPa]	0,93	1,18	0,83
Físicas	Massa Volúmica Real [kg/m <sup>3</sup> ]	2366,76	2407,42	2341,30
	Massa Volúmica Aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	1895,98	1983,86	1896,61
	Porosidade Aberta [%]	19,89	17,59	18,99
	Taxa de secagem [kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ] <sup>1)</sup>	0,33	0,28	0,27
	Índice de secagem [-] <sup>1)</sup>	0,09	0,13	0,12
	Valor assintótico [kg/m <sup>2</sup> ] <sup>1)</sup>	13,76	13,39	14,10
	Coefficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ] <sup>1)</sup>	12,53	10,21	10,98

<sup>1)</sup>Ensaio realizado com meios provetes (  $\approx 8\text{cm} \times 4\text{cm} \times 4\text{cm}$  )

## **Capítulo 3**

# **DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL**

### **3.1. Considerações iniciais**

O trabalho experimental descrito neste capítulo visa avaliar a influência de substituição de:

- Agregados finos normalizados por agregados reciclados provenientes de RCD;
- Ligante (cimento) por cinzas volantes não conformes provenientes de uma central termoelétrica.

A campanha experimental decorreu em laboratórios do Departamento de Engenharia Civil e o ensaio de FRX nos laboratórios do Departamento de Ciências dos Materiais da FCT/UNL.

O trabalho experimental apoia-se em três tipos de ensaios:

- Caracterização das matérias-primas constituintes das argamassas;
- Caracterização física das argamassas no estado fresco e endurecidas;
- Caracterização mecânica das argamassas endurecidas;
- Determinação da composição química por FRX - espectrometria de fluorescência de raios X, dos agregados reciclados e de duas argamassas endurecidas (constituídas com os mesmos agregados).

Em seguida são definidos os materiais a utilizar para o fabrico das argamassas e os procedimentos de ensaio adotados para a caracterização física das matérias-primas e mecânica das argamassas endurecidas.

Após a descrição de cada característica estudada são apresentados os resultados médios obtidos, seguidos de um breve comentário, sendo que as justificações dos mesmos são apresentadas no Capítulo 4. Os resultados individuais são mostrados no anexo I.

### **3.2. Materiais utilizados na preparação das argamassas**

Uma argamassa pode ser constituída por agregado, ligante (s) e água (e adições e/ou adjuvantes). Na presente dissertação, são incorporados nas argamassas materiais resultantes de resíduos de construção e demolição e resíduos industriais (cinzas volantes).

Em seguida, são descritos cada um dos componentes das várias argamassas produzidas.

#### **3.2.1. Ligante – Cimento**

Para as argamassas foi utilizado como ligante o cimento Portland de calcário CEM II/B-L 32,5 N da marca Secil, figura 3.1. Este cimento tem como constituintes principais clínquer (65 a 79 %), calcário (21 a 35 %) e outros constituintes (0 a 5 %) [IPQ, 2001].



Figura 3.1 - Cimento CEM II/B-L 32,5 N

#### **3.2.2. Agregados**

Para a produção das argamassas utilizaram-se dois tipos de agregados: agregado fino normalizado e agregado fino reciclado (sem lavagem prévia à realização dos provetes).

##### ***Agregado fino normalizado***

O agregado normalizado CEN - Comité Europeu de Normalização foi disponibilizado pela empresa SGR, figura 3.2. Este agregado é uma areia de grão arredondado proveniente de tratamentos industriais e granulometria fina, de acordo com a norma EN 196-1.



Figura 3.2 - Agregado fino normalizado ( $m=1350\pm5g$ )



### ***Agregado Fino Reciclado***

A recolha do material para a campanha experimental foi realizada na empresa SGR. De forma a uniformizar a sua composição, devido às diferentes características que os agregados apresentam, influenciadas pelo tipo de material de que é proveniente, foram recolhidas amostras do fundo, do meio e de topo de diversos locais, figura 3.3. em laboratório as três amostras foram misturadas em partes iguais, dando origem à mistura dos agregados utilizados nas argamassas.



a) Recolha de amostras do fundo do amontoado de agregado do local 1; b) Recolha de amostras do meio do amontoado de agregado do local 2; c) Recolha de amostras do topo do amontoado de agregado do local 3

Figura 3.3 - Recolha do agregado fino reciclado

### **3.2.3. Adições pozolânicas – Cinzas volantes**

As cinzas volantes utilizadas na composição das argamassas da presente dissertação têm natureza siliciosa e foram disponibilizadas pela Central Termoelétrica do Pego.

As cinzas foram recolhidas, e analisadas quimicamente, antes de serem depositadas no aterro (para que não sofrerem alterações na sua composição, devido à rega com água que é efetuada para evitar a libertação de poeira).

Na tabela 3.1 apresentam-se as percentagens de perda ao fogo de cada uma das amostras disponibilizadas pela central figura 3.4. As amostras pertencem a categorias diferentes, nomeadamente, conformes (categoria A) e não conformes (categoria B). Os limites de teor ao fogo de cada categoria e norma podem ser consultados na tabela 2.3.

Tabela 3.1 - Percentagem de perda ao fogo das amostras e classificadas segundo a norma NP EN 450-1

<b>Amostra</b>	<b>Tipo de cinzas</b>	<b>Perda ao fogo [%]</b>	<b>Categoria</b>
Amostra 1	Cinzas conformes	4,06	A
Amostra 2	Cinzas não conformes	8,13	B



a) Cinzas depositadas em aterro; b) Cinzas recolhidas

Figura 3.4 – Cinzas volantes

### 3.2.4. Água

A água utilizada para a preparação das argamassas é proveniente da rede pública de abastecimento do DEC – FCT/UNL, sendo a quantidade determinada e adicionada em função da trabalhabilidade pretendida (referida no ponto 3.6.2).

## 3.3. Ensaios de caracterização dos materiais

### 3.3.1. Análise granulométrica dos agregados

O ensaio de caracterização da granulometria foi realizado em ambos os agregados utilizados nas argamassas, tendo por base a norma NP EN 933-1 [IPQ, 2000].

Este ensaio permite a caracterização granulométrica do material, conhecendo-se assim a distribuição das partículas segundo as dimensões das mesmas.

Os peneiros utilizados neste ensaio, selecionados de acordo com a constituição da amostra, encontram-se descritos na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Peneiros utilizados na análise granulométrica dos diferentes agregados

Abertura da malha [mm]	Número do Peneiro	Agregado fino normalizado	Agregado fino reciclado
19,1	3/4"		✓
12,7	1/2"		✓
9,52	3/8"		✓
4,76	nº 4	✓	✓
2,38	nº 8	✓	✓
1,19	nº 16	✓	✓
0,595	nº 30	✓	✓
0,297	nº 50	✓	✓
0,149	nº 100	✓	✓
0,075	nº 200	✓	✓

O processo consiste na pesagem da amostra de agregado retida em cada um dos peneiros da série ASTM - American Society for Testing and Materials, posicionados de cima para baixo por ordem decrescente da dimensão da abertura das malhas, após vibrações conferidas pelo agitador mecânico. O material é colocado no peneiro com a maior malha, e este vai descendo por gravidade [Rato, 2006].

Após a secagem da amostra na estufa à temperatura de 100°C até massa constante<sup>2</sup>, esta é pesada de acordo com a sua constituição, 2000 g de agregado fino reciclado e 1000 g de agregado fino normalizado, figura 3.5 a). Em seguida, verte-se a amostra através dos peneiros, figura 3.5 b), e procede-se à agitação mecânica, durante 15 minutos para os agregados mais grosseiros e 10 minutos para o agregado fino normalizado. Após a peneiração, pesa-se o material retido em cada peneiro, separado pelas diferentes frações consoante as dimensões das partículas, figura 3.5 c).

A soma dos resíduos em cada peneiro deverá ser igual à massa inicial, com uma tolerância de 1%.



a) Pesagem inicial; b) Agitador mecânico e peneiros da serie ASTM utilizados;  
c) Pesagem individual do material retido em cada peneiro

Figura 3.5 – Ensaio de determinação da análise granulométrica

Dada a granulometria do agregado fino reciclado foi necessário utilizar 9 peneiros da série principal e um da série secundária. O agitador mecânico tem capacidade para 7 peneiros em simultâneo, como tal agrupou-se os peneiros em dois grupos (7+3). O grupo correspondendo às malhas superiores é primeiramente agitado e o material retido no fundo deste mesmo grupo é vazado na malha superior do segundo grupo, e posteriormente levado a nova agitação mecânica.

Os resultados são registados sob a forma de tabela, sendo constituída pelos seguintes elementos [Sousa-Coutinho, 1988]:

- Massa retida em cada peneiro
- Percentagem retida em cada peneiro

<sup>2</sup> Massa constante é obtida quando os valores de duas pesagens sucessivas, com intervalo de 24 horas, não diferem mais do que 0,1%.

- Percentagem total do que passa através do peneiro, ou seja a percentagem de material passado acumulado
- Percentagem total do que fica retido em cada peneiro.

Conhecendo a massa inicial da amostra, calcula-se a percentagem de massa de agregado retida em cada peneiro. Através desses resultados obtêm-se dados suficientes para construir uma curva granulométrica através das percentagens totais acumuladas que passam em cada peneiro e das respectivas dimensões das malhas. Esta curva, constituída por segmentos de reta, representa uma aproximação da caracterização granulométrica da amostra do material. Na figura 3.6 apresentam-se as curvas granulométricas médias dos agregados.

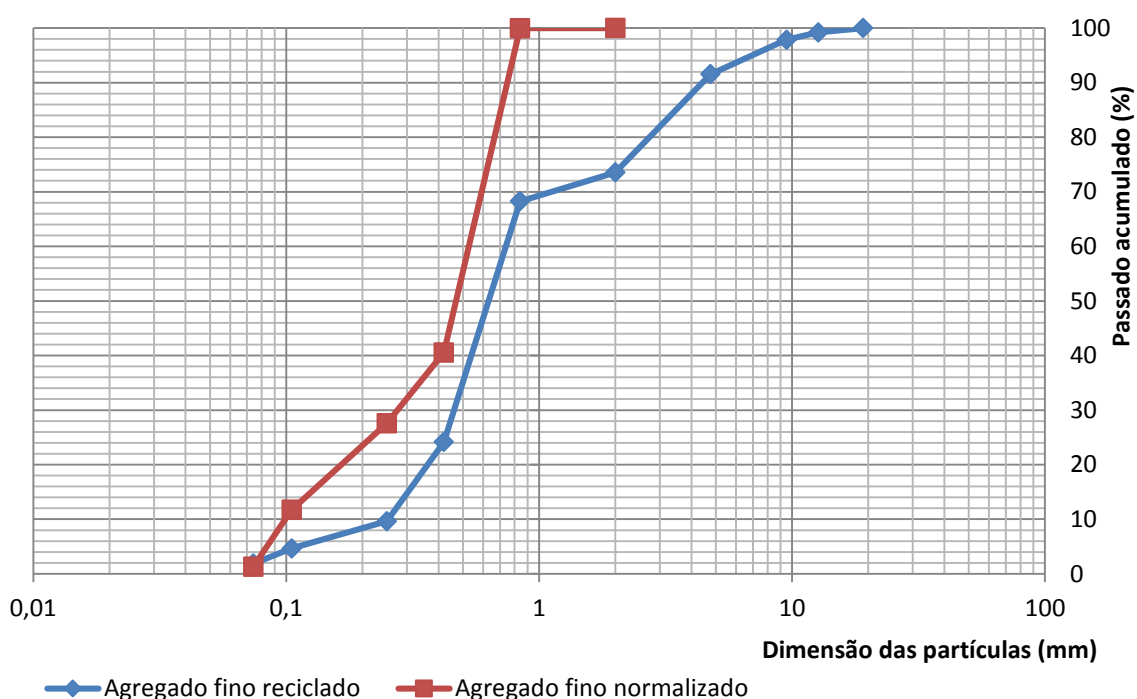


Figura 3.6 – Curvas granulométricas dos agregados utilizados

Neste ensaio, obtêm-se três parâmetros que caracterizam o material [Sousa-Coutinho, 1988]:

- Máxima dimensão de agregado, "D", que corresponde à menor abertura do peneiro, através do qual passa uma quantidade de pelo menos 90 % da amostra total de material;
- Mínima dimensão de agregado, "d", que corresponde à maior abertura do peneiro através do qual passa uma quantidade de 5 % ou menos da amostra total de material;
- Módulo de finura, "MF", obtido através da soma das percentagens totais que ficam retidas peneiros da série principal (exceto o #200) divididas por 100. Este parâmetro indica o peneiro onde ficou mais material retido (dimensão média ponderada), contado a partir da malha mais

fina (ex: num agregado com  $MF = 2$ , a dimensão média da amostra corresponde ao 2º peneiro da serie principal).

Na tabela 3.3 apresentam-se as características dos dois agregados. Os resultados individuais das amostras de cada agregado encontram-se no anexo I, tabelas I,1 a I.5.

Tabela 3.3 - Características físicas dos agregados

Material	MF	D [mm]	d [mm]
Agregado reciclado	3,3	4,76	0,149
Agregado normalizado	2,2	1,19	0,075

### 3.3.2. Baridade

A baridade (Ba) de um agregado define-se como a massa por unidade de volume do agregado contido num recipiente de volume conhecido. Este volume inclui os espaços vazios entre as partículas do agregado, e entre as partículas e o recipiente.

A baridade permite converter volumes de agregado em massa e vice-versa, ou seja os valores obtidos das baridades dos constituintes das argamassas serviram para converter o traço volumétrico em traço ponderado. Com estes valores foi possível determinar a quantidade em massa de cada material necessária para as amassaduras no trabalho experimental [Sousa-Coutinho, 1988].

A baridade depende do modo de compactação, volume de vazios, forma e dimensões das partículas e das condições de humidade a que o material está sujeito [Sousa-Coutinho, 1988].

O ensaio de determinação da baridade foi realizado em ambos os agregados (reciclado e normalizado), no ligante (cimento) e nas adições pozzolânicas (cinzas volantes). Tem como base o procedimento referido na norma NP EN 1097-3 [IPQ, 2002], diferindo apenas na utilização do funil metálico (dadas as dimensões do agregado reciclado foi utilizado um funil plástico adaptado, para permitir a passagem das partículas de maiores dimensões).

Primeiramente pesou-se o recipiente metálico vazio e limpo, e tarado, figura 3.7 a). O material previamente seco em estufa até massa constante, à temperatura de 100°C, é colocado no funil tapado na base com o auxílio de uma pá. Em seguida, remove-se a pá e o material é lançado a uma distância desde o aro do funil até ao bordo superior do recipiente de 50 mm, para garantir uma queda do material uniforme, sem qualquer compactação adicional além do seu peso próprio, figura 3.7 b). Após se ter completado o enchimento, procede-se à remoção do material excedente com o auxílio de uma régua metálica nivelando a superfície, figura 3.7 c). Por último, procede-se à pesagem do recipiente, tarado inicialmente, numa balança de precisão de 0,001g.



- a) Pesagem do recipiente vazio; b) Passagem do material para o recipiente através do funil;  
c) Nivelamento da superfície

Figura 3.7 – Ensaio de determinação da baridade

A baridade (Ba) é determinada através da seguinte expressão 3.1.

$$Ba = \frac{m_b - m_a}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (3.1)$$

sendo,

$m_b$  – Massa do material contido no interior do recipiente [kg];

$m_a$  – Massa do recipiente [kg];

$V$  – Volume conhecido do recipiente vazio [m<sup>3</sup>].

Foram realizadas três medições para cada um dos agregados e cada um dos ligantes. Os resultados médios das amostras são apresentados na tabela 3.4, sendo os valores detalhados de cada baridade apresentados no anexo I, tabela I.6.

Tabela 3.4 - Resultados médios das baridades dos constituintes das argamassas

Material	Baridade [kg/m <sup>3</sup> ]
Agregado fino reciclado	1037,4
Agregado fino normalizado	1589,1
Cimento	1032,9
Cinza volante conforme	1118,8
Cinza volante não conforme	1050,6

### 3.4. Formulação das argamassas

Na presente campanha experimental foram analisadas 8 formulações de argamassas com diferentes composições relativamente ao agregado utilizado e às cinzas conformes e não conformes, ao traço volumétrico de 1:3 (ligante: agregado).



Foram produzidas argamassas sem adições pozolânicas e argamassas com adições pozolânicas (cinzas volantes). Das argamassas sem adições pozolânicas, constituídas por ligante e agregado, analisou-se areia normalizada (N) e agregado reciclado (R) e definiram-se como as “argamassas de referência”. As adições pozolânicas foram utilizadas em substituição de 1/6 da massa do ligante (cimento) por cinzas volantes conformes (Vc) ou por cinzas volante não conformes (Vnc) perfazendo um traço volumétrico de 1:0,2:3,6 (ligante:cinzas:agregado).

As cinzas volantes foram usadas em argamassas constituídas por agregados reciclados (RVc e RVnc), agregados normalizados (NVc e NVnc), e ainda, numa combinação de 50% de cada agregado (NRVc e NRVnc).

Tendo-se verificado nas formulações anteriores constituídas por agregado reciclado um fenómeno de presa<sup>3</sup> instantânea, dificultando a moldagem dos provetes, decidiu-se repetir a amassadura juntando um adjuvante (retardador de presa) originando uma argamassa com agregado reciclado, denominada por R'r.

Como consequência da presa instantânea foi necessário realizar duas amassaduras por cada argamassa, o que duplicou o consumo do material. Neste contexto, verificou-se a insuficiência de material para a realização das formulações com adição do retardador de presa. Nas amassaduras em que foi utilizado o retardador de presa o agregado é constituído apenas por uma das frações das amostras de agregado utilizadas para as argamassas iniciais (1ª fase). Esta única fração de material é designada de agregado remanescente, sendo assim agregado recolhido apenas num único local e não da mistura dos três locais, contrariamente ao referido no ponto 3.2.2.

Dada a variedade de material que é recebido pela empresa, voltar a recolher material não seria uma solução viável, pois o material recolhido iria ser distinto quanto à sua composição em relação ao reunido inicialmente. Face a este problema, realizou-se nova amassadura sem o retardador de presa, para que não permanecessem dúvidas se o material continha as mesmas características que o material de mistura dos três locais de recolha. Realizaram-se mais seis provetes prismáticos constituídos apenas por agregado reciclado remanescente e cimento, denominado por R'.

Estas duas “novas amassaduras” foram designadas como “fase 2”, correspondendo, neste contexto, as 8 amassaduras iniciais à “fase 1”.

Na tabela 3.5 apresentam-se as designações das siglas adotadas para cada argamassa ao longo da presente dissertação.

---

<sup>3</sup> A presa consiste na perda progressiva da consistência pastosa da mistura, definida pelo intervalo de tempo entre a adição de água e a compactação da argamassa, ou seja, o tempo em que permanece trabalhável. O instante em que a massa começa a perder a sua consistência pastosa é o início da presa, e quando deixa de ser deformável é o fim da presa, transformando-se numa massa rígida que define o início do endurecimento. O endurecimento é o prolongamento da presa e responsável pelo desenvolvimento de todas as características (Sousa-Coutinho, 1988).

Tabela 3.5 - Designações das siglas utilizadas na identificação das argamassas estudadas

Fase	Designação	Composição
1	N	Argamassa de cimento com agregado fino normalizado
	NVc	Argamassa de cimento com agregado fino normalizado e cinzas volantes conformes
	NVnc	Argamassas de cimento com agregado fino normalizado e cinzas volantes não conformes
	R	Argamassa de cimento com agregado fino reciclado
	RVc	Argamassas de cimento com agregado fino reciclado e cinzas volantes não conformes
	RVnc	Argamassas de cimento com agregado fino reciclado e cinzas volantes não conformes
	NRVc	Argamassas de cimento com agregados fino normalizado e reciclado com cinzas volantes conformes
	NRVnc	Argamassas de cimento com agregados fino normalizado e reciclado com cinzas volantes não conformes
2	R'r	Argamassas de cimento e agregado fino reciclado (remanescente) e retardador de presa
	R'	Argamassas de cimento e agregado fino reciclado (remanescente)

A tabela 3.6 resume as composições de todas as argamassas ensaiadas com as suas respetivas proporções.

Tabela 3.6 – Proporções entre os componentes em volume

Argamassas	Ligante	Proporções entre Agregado		Proporções entre cinzas volantes		Adjuvante
	Cimento	Normalizado	RCD	Conformes	Não-Conformes	Retardador de presa
N	1	3	--	--	--	--
R	1	--	3	--	--	--
NVc	5/6	3	--	1/6	--	--
NVnc	5/6	3	--	--	1/6	--
RVc	5/6	--	3	1/6	--	--
RVnc	5/6	--	3	--	1/6	--
NRVc	5/6	3/2	3/2	1/6	--	--
NRVnc	5/6	3/2	3/2	--	1/6	--
R'r	1	--	3	--	--	1% da massa do ligante
R'	1	--	3	--	--	--

### 3.5. Preparação das argamassas

Para definir as quantidades necessárias de cada constituinte das argamassas, de forma a preencher todos os moldes recorreu-se a um volume padrão de referência (850 cm<sup>3</sup>). Fazendo corresponder este volume ao traço volumétrico pretendido (1:3), e multiplicado pela baridade de cada material, obtém-se a massa necessária dos constituintes para cada amassadura.

A quantidade de água necessária para cada amassadura foi determinada através de consultas de outros trabalhos experimentais no mesmo âmbito, nomeadamente A.Barra [Barra, 2011], evitando



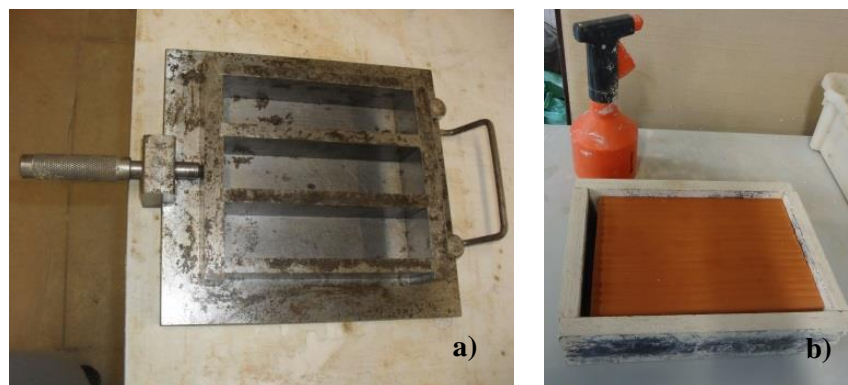
desperdícios de material em sucessivas tentativas de amassaduras até encontrar o a/l pretendido (principalmente da areia normalizada).

Recorrendo a moldes metálicos, figura 3.8 a) e moldes em tijolos cerâmicos furados, figura 3.8 b), foram efetuados 60 provetes prismáticos e 8 provetes sobre suporte em tijolos cerâmicos para os provetes do ensaio de aderência ao suporte.

Em síntese, a tabela 3.7, apresenta o número e tipo de provetes produzidos em ambas as fases de amassaduras.

Tabela 3.7 – Quantificação dos provetes para a caracterização das argamassas endurecidas

Tipo de provetes	Dimensões dos provetes	Numero dos provetes
Prismáticos (fase 1)	16 cm × 16 cm × 4 cm	48
Prismáticos (fase 2)		12
Sobre tijolos cerâmicos	30 cm × 20 cm × 1,5 cm	8



a) Molde dos provetes prismáticos; b) Molde em tijolo cerâmico

Figura 3.8 – Provetes utilizados

### 3.5.1. Amassadura

A preparação das amassaduras foi feita tendo por base a norma NP EN 196 [IPQ, 2006] embora com algumas alterações.

Inicialmente pesaram-se as quantidades necessárias de cada constituinte da argamassa (agregados e ligantes) de acordo com a quantidade definida para cada amassadura. Procedeu-se à homogeneização manual a seco dos materiais no tabuleiro, figura 3.9 a), para posterior colocação da mistura na cuba, figura 3.9 b), onde são executadas as amassaduras.

É colocado em funcionamento o misturador mecânico durante 45 segundos, figura 3.9 c) e d), sendo adicionada simultaneamente à mistura a quantidade de água, medida previamente numa proveta graduada, figura 3.9 e). Após um intervalo de 30 segundos na amassadura, para limpeza dos bordos da cuba com a espátula, reinicia-se a mesma, durante 60 segundos.



a) Homogeneização manual dos constituintes; b) colocação da mistura na cuba; c) e d) Misturador mecânico; e) Adição de água à mistura

Figura 3.9 – Preparação das argamassas em pasta

Devido à presa instantânea, que provocou uma grande dificuldade de compactação, foi necessário recorrer à compactação manual dos provetes, através do auxílio de um pilão metálico com base quadrada, em duas camadas de altura semelhante (consequência do facto que após o preenchimento dos primeiros moldes metálicos a mistura endurecia muito rapidamente, não sendo possível moldar os restantes moldes), figura 3.10.



a) Argamassa endurecida devido à presa instantânea; b) Compactação manual com pilão;  
c) Impossibilidade de moldar os segundos moldes

Figura 3.10 – Dificuldade de compactação das argamassas com agregado reciclado

Com o objetivo de identificar os constituintes dos agregados reciclados e consequentemente a razão pela qual acontece o fenómeno de presa instantânea recorreu-se a análises de composição química por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), realizadas no Departamento de Ciências dos Materiais da FCT-UNL, para verificar se a presa instantânea pode esta associada à heterogeneidade do agregado. Estes podem conter na sua constituição, sulfatos de cálcio (produto da calcinação da

gesso) que quando misturados com água, endurecem. Foram analisadas, a matéria-prima do agregado remanescente e duas amostras de argamassa endurecida, constituídas uma por agregado reciclado (inicial) e cimento e outra por agregado (remanescente) e cimento, denominadas R e R', respectivamente, figura 3.11.

Os resultados (apresentados no Anexo III) mostram que as amostras de agregado reciclado contêm uma grande quantidade de sulfatos ( $\text{SO}_3$ ) na sua composição.

Os sulfatos são contaminantes que podem estar presentes nos agregados reciclados, sendo a sua principal fonte o gesso de construção. Quando mais moído for o gesso, maior é a sua superfície específica e, conseqüentemente, do material exposto à hidratação, o que se traduz numa presa mais rápida (para a mesma quantidade de água da amassadura) [Sousa Coutinho, 2002].

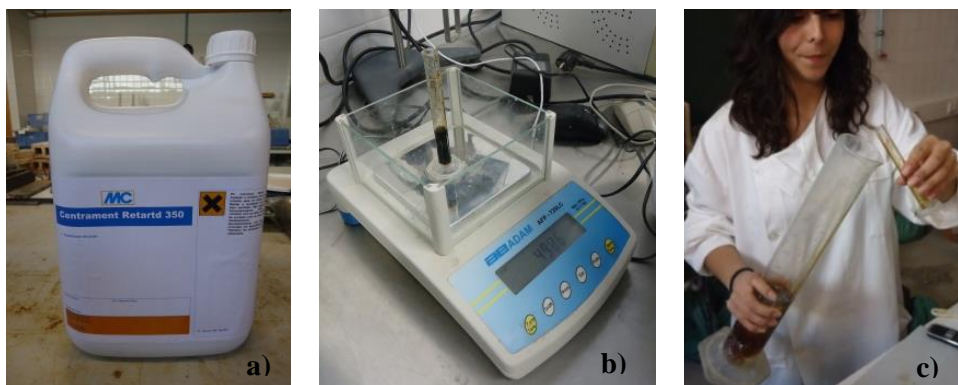
Segundo G. Aguiar [Aguiar, 2004] não existe um consenso internacional quanto ao limite de sulfatos presente nos agregados reciclados; no entanto estima-se como limite máximo de 1%. Como se verifica nas análises disponíveis no Anexo III, a percentagem de  $\text{SO}_3$  presente nos agregados utilizados é muito elevada, podendo estar na origem presa rápida que se verificou durante as amassaduras.



Figura 3.11 – Análises FRX

O procedimento utilizado para a realização dos provetes da fase 2, com a adição do adjuvante, foi semelhante ao descrito anteriormente, diferenciado apenas na adição do retardador de presa, marca MC com referência Centrament Retardt 350, figura 3.12 a). A dosagem e o modo de aplicação do produto são os recomendados pelo fabricante, de acordo com a ficha técnica do produto apresentada no Anexo II. No desenvolvimento experimental, a dosagem de produto utilizada foi de 1% da massa do ligante.

Pesou-se a quantidade de retardador numa proveta graduada e adicionou-se o retardador na última parte água previamente determinada, sendo em seguida adicionado à mistura dentro do misturador mecânico, onde foi homogeneizado durante 60 segundos, figura 3.12 b) e c).



a) Retardador de presa: b) Pesagem do retardador de presa a incluir na amassadura;  
c) Adicionamento do retardador de presa à água

Figura 3.12 – Procedimento da 2ª fase de amassaduras com o adjuvante

### 3.5.2. Moldagem

Previamente à colocação da argamassa nos moldes realizou-se o ensaio de consistência por espalhamento para determinar a trabalhabilidade da amassadura, cuja descrição se apresenta no ponto 3.6.2.

Os moldes metálicos foram previamente limpos e envernizados com óleo descofrante, para facilitar a desmontagem dos mesmos. Os moldes são posicionados e fixados na mesa do compactador mecânico, figura 3.13 a), onde se procedeu ao seu enchimento, em duas camadas de altura semelhante, figura 3.13 b). A compactação mecânica foi realizada através de 20 pancadas de cada camada. Por fim, retira-se o excesso de argamassa, nivelando a superfície com o auxílio de uma espátula, figura 3.13 c).

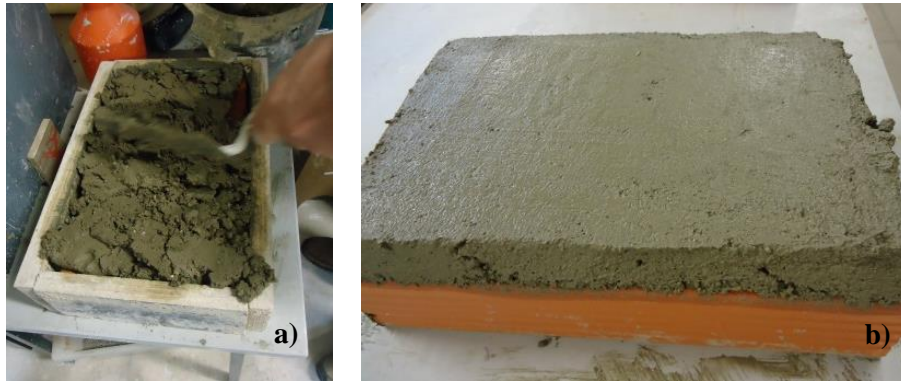


a) Compactador mecânico; b) Colocação da pasta nos moldes prismáticos;  
c) Moldes com pasta no estado fresco

Figura 3.13 – Moldagem e compactação dos moldes prismáticos



Relativamente aos provetes para o ensaio de aderência (com o objetivo de simular a aplicação de um reboco sobre uma alvenaria de tijolo), procedeu-se à produção de argamassas sobre tijolos furados com dimensões de 20cm×30cm×7cm. Colocou-se um molde de madeira em torno do tijolo com uma altura acima das arestas de 1,5cm. Humedeceu-se a superfície do tijolo com água, para evitar que a água necessária às reações de hidratação seja absorvida pelo suporte e aplica-se a argamassa sob o suporte com o auxílio de colher pedreiro preenchendo o molde, figura 3.14 a). Por fim, procedeu-se ao alisamento da superfície retirando o excesso de argamassa, figura 3.14 b).



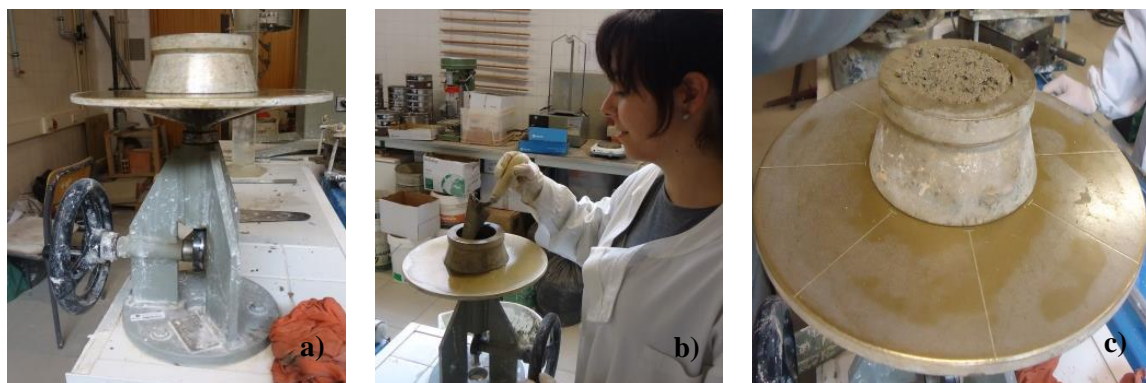
a) Colocação da argamassa sobre o tijolo cerâmico: b) Aspeto final do molde em tijolo cerâmico

Figura 3.14 – Realização dos provetes sobre os tijolos cerâmicos

### 3.6. Caracterização das argamassas frescas

#### 3.6.1. Ensaio de consistência por espalhamento

Tal como referido, previamente à moldagem foi realizado sobre as argamassas no estado fresco o ensaio de consistência por espalhamento, realizado com base na norma EN 1015-3 [IPQ, 1999c]. Este ensaio auxilia na determinação da quantidade de água necessária em cada amassadura através da trabalhabilidade pretendida, isto é, através da quantidade de água necessária que possibilita o intervalo de espalhamento desejado para as aplicações pretendidas destas argamassas. Primeiramente, procedeu-se ao humedecimento de todos os utensílios, nomeadamente, a base e o cone de espalhamento e o varão de apiloamento. Colocou-se o molde tronco cónico no centro da mesa de consistência, figura 3.15 a), e procedeu-se ao seu enchimento em duas camadas de altura semelhante compactadas individualmente com um varão de 15 mm de diâmetro, figura 3.15 b). Retirado o excesso de material, nivelou-se a superfície com uma espátula e cuidadosamente é retirado o molde, figura 3.15 c). A compactação da mistura é realizada através da rotação da manivela com 15 pancadas em 15 segundos. Por fim, mediram-se os quatro diâmetros gravados na mesa com uma craveira. O espalhamento é calculado determinando a média dos diâmetros, arredondados à unidade.



a) Mesa de consistência; b) Colocação da argamassa no suporte; c) Alisamento da superfície

Figura 3.15 – Ensaio de consistência por espalhamento das argamassas frescas

O valor do espalhamento é expresso em percentagem (%), dado pela seguinte expressão 3.2.

$$\text{Esp} = \frac{(d - 10)}{10} \times 100 [\%] \quad (3.2)$$

Sendo,

d – Média dos 4 diâmetros [cm];

10 – Diâmetro interior da base do molde tronco cónico [cm].

Na tabela 3.8 são apresentadas as percentagens de espalhamento de cada amassadura dados pelo valor médio de espalhamento, assim como a razão água/ligante (a/l). Os resultados das leituras individuais dos diâmetros encontram-se no anexo I, tabela I.7.

Tabela 3.8 - Resultados do ensaio de consistência por espalhamento

Argamassa	Razão [a/l]	Espalhamento [mm]	DP	Espalhamento [%]
N	0,66	169	4,3	69
R	0,89	--	--	--
NVc	0,66	170	1,3	70
NVnc	0,77	175	0,8	75
RVc	0,85	--	--	--
RVnc	0,86	--	--	--
NRVc	0,54	154	5,1	54
NRVnc	0,85	168	1,5	68
R'r	0,89	170	2,9	70
R'	0,89	167	2,1	67

Nas argamassas constituídas por agregado fino reciclado, o resultado deste ensaio foi ignorado, uma vez que, devido à presa instantânea, o espalhamento foi quase nulo, figuras 3.16.

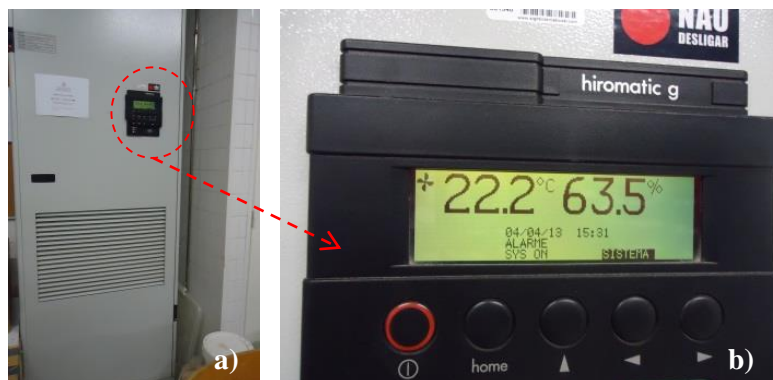


a) Consistência da argamassa antes do ensaio b) Consistência da argamassa após o ensaio

Figura 3.16 - Argamassas com agregados reciclados no ensaio de consistência por espalhamento

### 3.7. Ensaios de caracterização das argamassas endurecidas

Após a moldagem dos provetes, estes foram colocados numa sala do DEC/FCT-UNL com ambiente condicionado: humidade relativa de  $65 \pm 5\%$  e temperatura de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , figura 3.17, onde decorreu a cura baseada na norma EN 1015-11 [CEN, 1999a]. Os provetes foram desmoldados após cinco dias, (pois se considerou mais adequado do que dois dias) permanecendo na mesma sala de ambiente condicionado, assentes numa mesa e sob suportes de poliestireno (para que todas as suas faces tenham contacto com o ambiente). Foram mantidos nas condições referidas durante 28 dias de cura.



a) Câmara climática b) Condições de cura no ambiente condicionado;

Figura 3.17 – Sala de ambiente condicionado

A sequência dos ensaios dos provetes prismáticos é iniciada no ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico. Segue-se o ensaio destrutivo de tração por flexão, no qual resultam duas partes de cada provete, sendo que numa das partes se efetua o ensaio de capilaridade e secagem e na outra realiza-se o ensaio de resistência à compressão. Deste último resultam três partes do provete inicial, onde numa destas se efetua o ensaio de massa volúmica e porosidade aberta.

A figura 3.18 ilustra um esquema representativo da sequência dos ensaios.

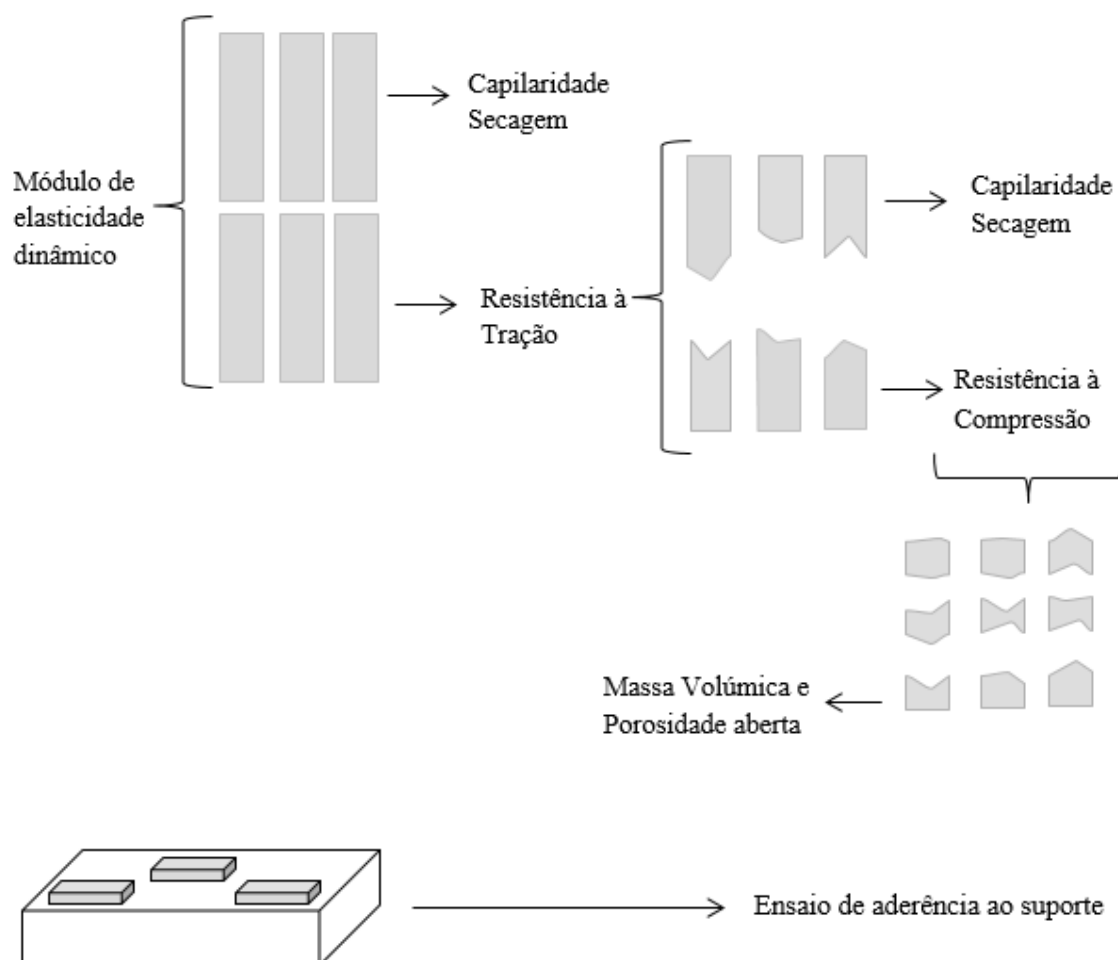


Figura 3.18 – Esquema ilustrativo da sequência dos ensaios

Para permitir uma análise mais clara e uma visualização dos resultados utilizou-se uma metodologia baseada em diferenciação de cores de acordo com a constituição das argamassas - graduação de cores desde a mais escura para argamassas sem cinzas até mais à clara para argamassas com cinzas. Também se diferenciaram as argamassas com agregados reciclados das argamassas com agregados normalizados através das cores de laranja e azuis respetivamente. As cores cinza representam as argamassas de 2ª fase e os verdes correspondem às argamassas com agregados com ambos os agregados.



### 3.7.1. Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico das argamassas foi determinado de acordo com a norma NP EN 14146 [IPQ, 2007]. Consiste na determinação da frequência mais baixa de ressonância longitudinal do provete para a qual se obtém a máxima amplitude. Para tal é utilizando um equipamento capaz de emitir vibrações e um programa de cálculo, ZEUS Resonance Meter, figura 3.19 a).

Previamente à execução do ensaio, os provetes foram pesados numa balança de precisão 0,001 g e os seus dados (dimensões e peso) são introduzidos no programa. Em seguida, colocam-se os provetes no equipamento, e aplica-se numa extremidade uma fonte emissora de vibração e na outra a unidade de receção a cerca de 1mm figura 3.19 b).

Procede-se à ligação de oscilador de frequência variável que alimenta o vibrador, com registo das amplitudes das vibrações, correspondendo as condições de ressonância às amplitudes máximas.



a) Programa de cálculo associado ao equipamento ZEUS Resonance Meter; b) Medição da frequência de ressonância longitudinal do provete

Figura 3.19 – Equipamentos utilizados na determinação do módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade dinâmico  $E$  é determinado através da expressão 3.3 [Faria, 2004].

$$E_{\text{din}} = (2 \cdot l \cdot f_0)^2 \times \frac{\rho}{g} \times 10^{-6} \text{ [MPa]} \quad (3.3)$$

sendo,

$l$  – Comprimento do provete [m];

$f_0$  – Frequência de ressonância longitudinal [Hz];

$\rho$  – Massa volúmica do material [ $\text{N/m}^3$ ];

$g$  – Aceleração da gravidade ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ).

Foram realizadas quatro medições por provete, alterando a sua posição no suporte através de uma rotação em torno do eixo longitudinal. O módulo de elasticidade final de cada argamassa é dado pela média dos valores obtidos das várias leituras efetuadas.

O módulo de elasticidade dinâmico traduz a capacidade do material absorver deformações, ou seja, a suscetibilidade das argamassas resistirem à fendilhação e à deformabilidade. Esta característica tem maior influência em situações que exista diferente rigidez entre o revestimento e o suporte, isto é, o reboco e o suporte apresentarem deformações diferentes, para a mesma ação, que pode originar fissurações e/ou destacamentos do reboco. Deste modo, quanto maior o valor do módulo de elasticidade dinâmico, maior rigidez os materiais apresentam (menos deformáveis), enquanto valores baixos correspondem a materiais com elevada deformabilidade.

A tabela 3.9 e a figura 3.20 apresentam os valores médios e o respetivo desvio-padrão do módulo de elasticidade para as argamassas aos 28 dias. Os resultados individuais encontram-se no Anexo I, tabelas I.8 a I.17.

Tabela 3.9 – Resultados médios e desvio padrão do módulo de elasticidade dinâmico

Argamassas	Módulo de elasticidade [MPa]	
	$E_{din}$ médio	DP
N	2356	273
R	1857	145
NVc	2479	222
NVnc	2468	95
RVc	1823	145
RVnc	8039	113
NRVc	2054	21
NRVnc	8580	469
R'r	7897	227
R'	8509	61

Através dos valores da tabela 3.9 e análise da figura 3.20 verifica-se que os valores de módulo de elasticidade dinâmico das argamassas N, R, NVc, NVnc, RVc e NRVc não correspondem à gama de valores característicos para argamassas de cimento, apresentados na secção 2.3 e resumidos na tabela 3.10. Assim sendo, estes valores não são contabilizados para comparações e análises de tendências entre argamassas. Em relação às restantes argamassas (RVnc, NRVnc, R'r e R') devido à ausência de argamassas de referência para comparação, não é possível utilizar estes valores para análises de tendências relativamente a este parâmetro. Por este motivo, estes resultados não são utilizados ao longo da presente dissertação.

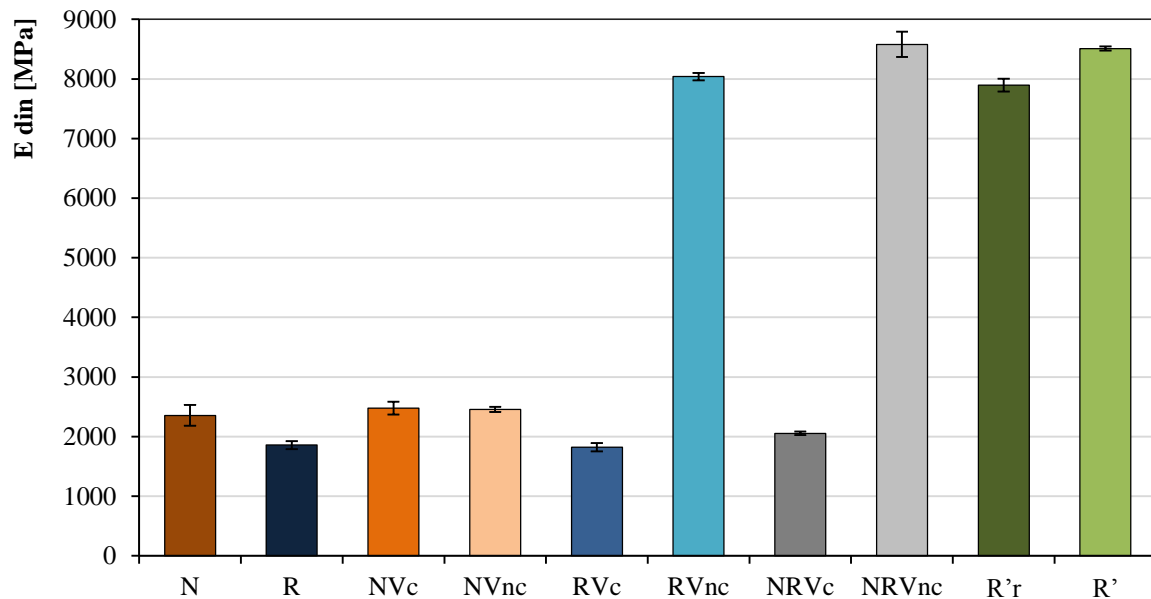


Figura 3.20 – Resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico

Tabela 3.10 – Valores de módulo de elasticidade dinâmico obtido por outros autores em argamassas de cimento

Autor	$E_{din}$ [MPa]
P. Faria [Faria, 2004]	9770,0
M. Braga [Braga, 2010]	7110,0
C. Neno [Neno, 2010]	7070,0
A. Barra [Barra, 2011]	9485,0

### 3.7.2. Resistências à tração por flexão e à compressão

As características de resistência mecânica de flexão e compressão permitem compreender e determinar a capacidade resistente das argamassas. Ambos os ensaios são determinados de acordo com a norma EN 1015-11 [CEN,1999a].

O ensaio de flexão é realizado com provetes inteiros e o de compressão com um dos dois “meios” provetes resultantes do ensaio de flexão. Os provetes foram colocados de modo a que o contato entre estes e as superfícies do aparelho seja assegurado por faces de moldagem.

#### *Resistência à tração por flexão*

Neste ensaio foi utilizada uma máquina universal Zwick/Rowell Z050, sendo induzida a tração por flexão imposta em três pontos dos provetes, através de uma célula de carga de 2 kN a meio vão longitudinal e uma distância de 100 mm entre os dois apoios, figura 3.21.



Figura 3.21 - Esquema ilustrativo do ensaio de resistência à tração por flexão

A aplicação da carga a uma velocidade de 5,1mm/min ocorreu até o provete atingir a rotura, determinando-se nesse momento a força máxima de tração  $F_t$ , figura 3.22.



a) ZWICK Z050; b) Aplicação da carga a meio vão; c) Aspecto final do provete após ensaio

Figura 3.22 – Ensaio de resistência à tração por flexão

O valor da força máxima atingida para cada provete é dado pela seguinte expressão 3.4 [CEN, 1999a].

$$R_t = 1,5 \times F_t \times \frac{L}{b^3} \quad [\text{MPa}] \quad (3.4)$$

sendo,

$F_t$  – Carga de rotura à tração por flexão;

$L$  – Distância entre os apoios inferiores [100 mm];

$b$  – Largura da base do provete [40mm].

### **Resistência à compressão**

Para o ensaio de compressão foi utilizado o mesmo equipamento (Zwick/Rowell Z050) diferindo no acessório utilizado, que assegura uma área de contacto de 1600mm<sup>2</sup>, de secção quadrada e uma aplicação de uma carga de 50 kN à velocidade de 5,2 mm/min, figura 3.23.

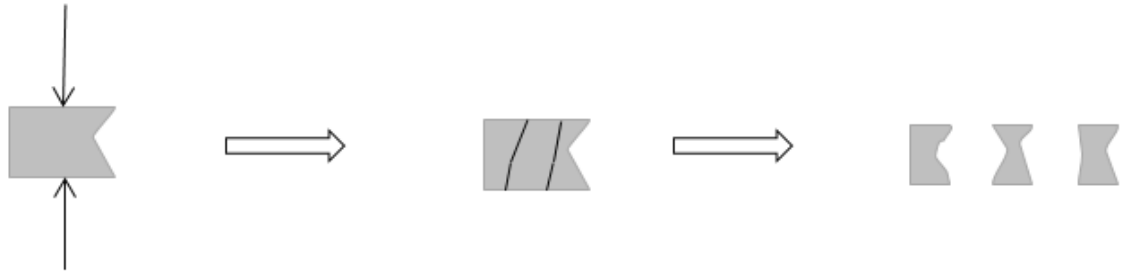
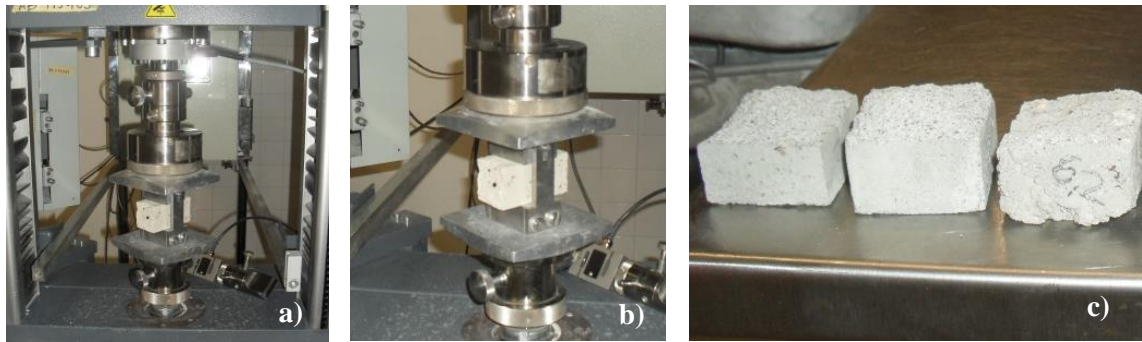


Figura 3.23 – Esquema ilustrativo do ensaio de resistência à compressão

A carga é aplicada até se atingir a rotura, momento em que se determina a força máxima de compressão que o provete foi sujeito,  $F_c$ , figura 3.24. A metade do provete a ensaiar foi cuidadosamente colocada com a face rugosa na lateral, no devido dispositivo auxiliar que permite o contacto entre o equipamento e o provete.



a) ZWICK Z050; b) Aplicação da célula de carga; c) Aspecto final do provete após a realização do ensaio

Figura 3.24 – Ensaio de resistência à compressão

O valor da resistência à compressão  $R_c$  é calculado pela expressão 3.5 [CEN, 1999a].

$$R_c = \frac{F_c}{A} \text{ [MPa]} \quad (3.5)$$

sendo que:

$F_c$ - Força máxima de compressão [N];

$A$  – Área de contacto ( $40 \times 40 = 160 \text{ mm}^2$ ).

Na tabela 3.11 e na figura 3.25 apresentam-se os resultados médios e os respetivos desvios-padrão dos ensaios à flexão e à compressão. Os resultados individuais encontram-se no Anexo I, tabela I.18.

Tabela 3.11 – Resultados médios dos ensaios de resistência à tração por flexão e à compressão

Argamassas	Resistência à tração por flexão [MPa]		Resistência à compressão [MPa]	
	$R_f$ médio	DP	$R_c$ médio	DP
N	3,01	0,3	15,66	2,4
R	2,68	0,1	10,83	0,6
NVc	3,40	0,4	12,16	0,7
NVnc	1,96	0,1	11,75	0,9
RVc	2,28	0,1	8,81	1,2
RVnc	2,24	0,1	8,27	2,1
NRVc	2,75	0,3	8,73	2,2
NRVnc	1,62	0,0	6,15	0,8
R'r	2,37	0,0	5,67	0,8
R'	2,57	0,2	9,15	1,5

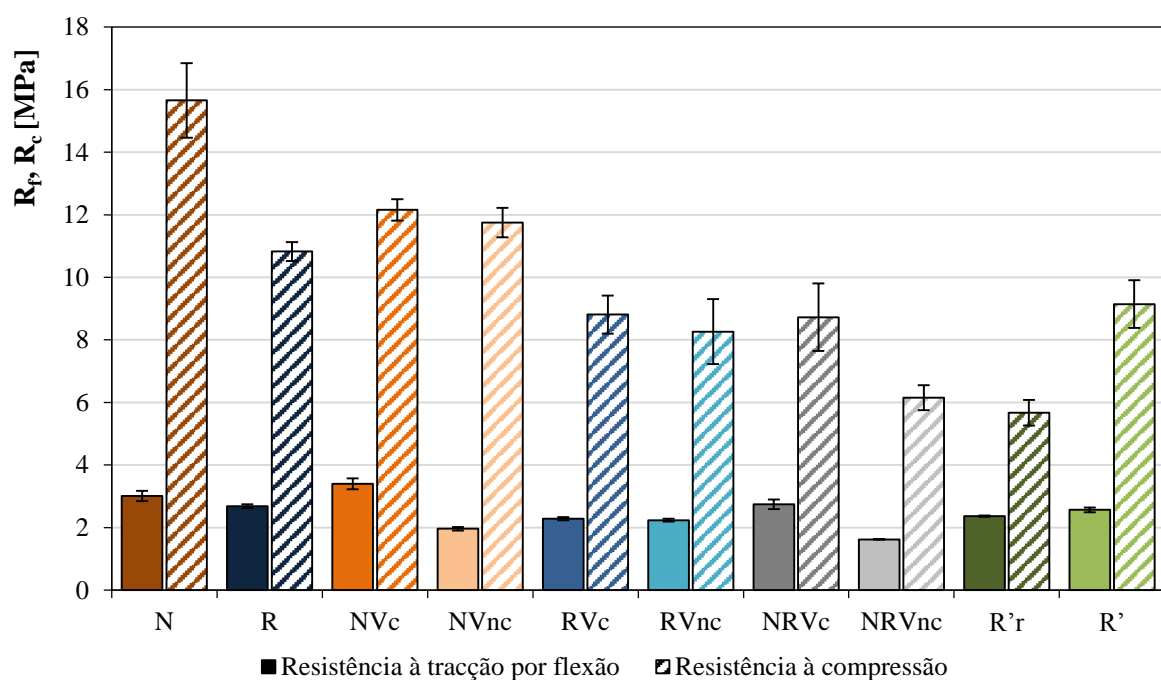


Figura 3.25 – Resultados médios obtidos no ensaio de resistência à compressão e resistência à tração por flexão

Através da figura 3.25 verifica-se que as argamassas com agregados normalizados (N) são as que apresentam maiores resistências. Relativamente à presença de cinzas volantes constata-se que estas argamassas apresentam resistências menores comparativamente às argamassas de referência sem cinzas volantes.

### 3.7.3. Capilaridade

O ensaio de capilaridade determina a capacidade que o material tem de absorver água através dos seus poros quando se encontram em contato com água. As forças capilares, que resultam na diferença de pressão entre os poros e o exterior, são inversamente proporcionais ao diâmetro capilar. Portanto, para materiais com a mesma porosidade (percentagem de poros), quanto menor for a dimensão dos poros, maior e mais rápida será a sucção de água por absorção [Faria, 2004].

A metodologia de ensaio realizou-se de acordo com a EN 1015-18 [CEN, 2002], mas as faces laterais dos provetes não foram impermeabilizadas. Este ensaio foi realizado numa sala climatizada, com temperatura de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e a uma humidade relativa de  $65 \pm 5\%$ .

Neste ensaio utilizam-se “meios” provetes (obtidos após a realização do ensaio de tração por flexão), e provetes inteiros.

Previamente ao ensaio, os provetes foram colocados numa estufa ventilada a  $60^\circ\text{C}$  até atingirem massa constante, sendo posteriormente colocados dentro de um recipiente de plástico fechado, e saturado, contendo um tabuleiro (assente num tijolo cerâmico) com uma rede de plástico e uma lâmina de água com cerca de 2 mm de altura. Os provetes foram colocados no tabuleiro, após ter sido registado a sua massa seca, numa balança de precisão de 0,001g, figura 3.26. Em intervalos de tempo definidos - 5, 10, 15, 30, 60, 180 e 360 minutos e a cada 24 horas até estabilizar<sup>4</sup>, é determinada a massa de cada provete.

A caixa deve ser mantida fechada com a tampa, de modo a manter constantes as condições de humidade e reduzir o volume de água evaporada. A lâmina de água de 2 mm deve ser controlada e mantida através de reposição de água sempre que necessário.



a) Disposição dos provetes para ensaio; b) Pesagem dos provetes

Figura 3.26 – Ensaio de capilaridade

<sup>4</sup> Considera-se que o provete estabilizou, quando a diferença entre duas pesagens consecutivas com intervalo de 24 horas, for menor que 1% da massa do provete.

A partir das medições efetuadas, é calculado o valor da quantidade de água absorvida (M), para cada uma das determinações de massa, através da equação 3.6 [Faria,2004].

$$M = \frac{m_i - m_0}{S} \text{ [kg/m}^2\text{]} \quad (3.6)$$

sendo,

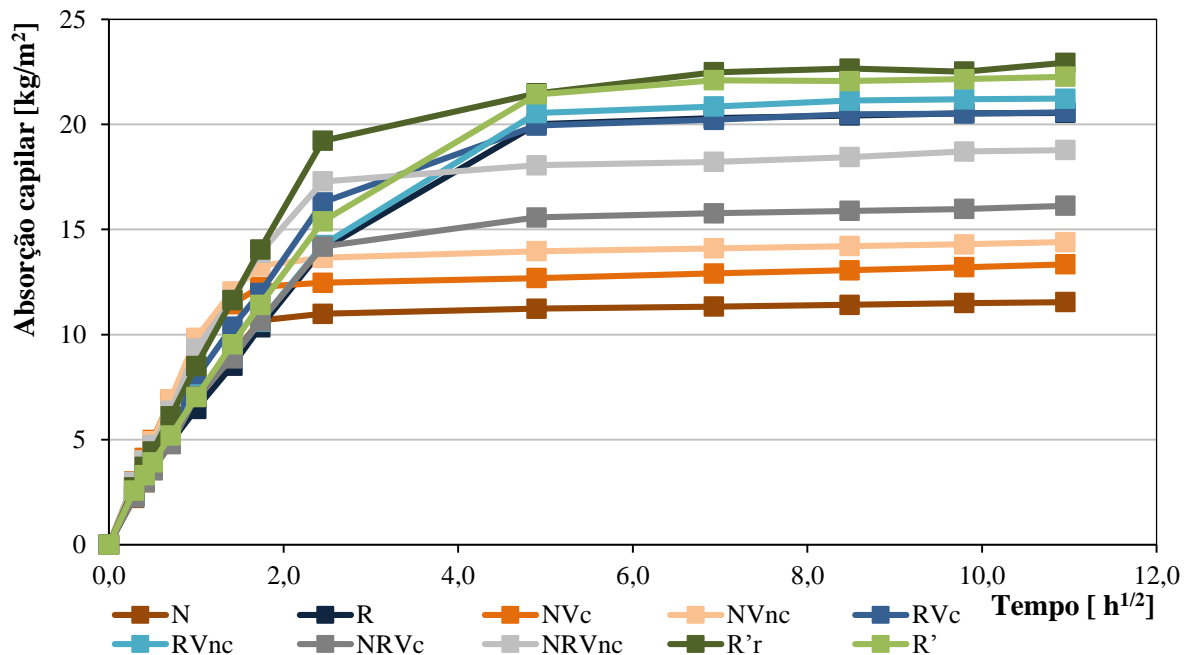
$m_i$  – Massa do provete seco no intervalo de tempo definido [kg];

$m_0$  – Massa do provete seco (no início do ensaio) [kg];

S - Área da superfície da base do provete em contacto com a água ( $0,04 \times 0,04 = 0,0016 \text{ m}^2$ ).

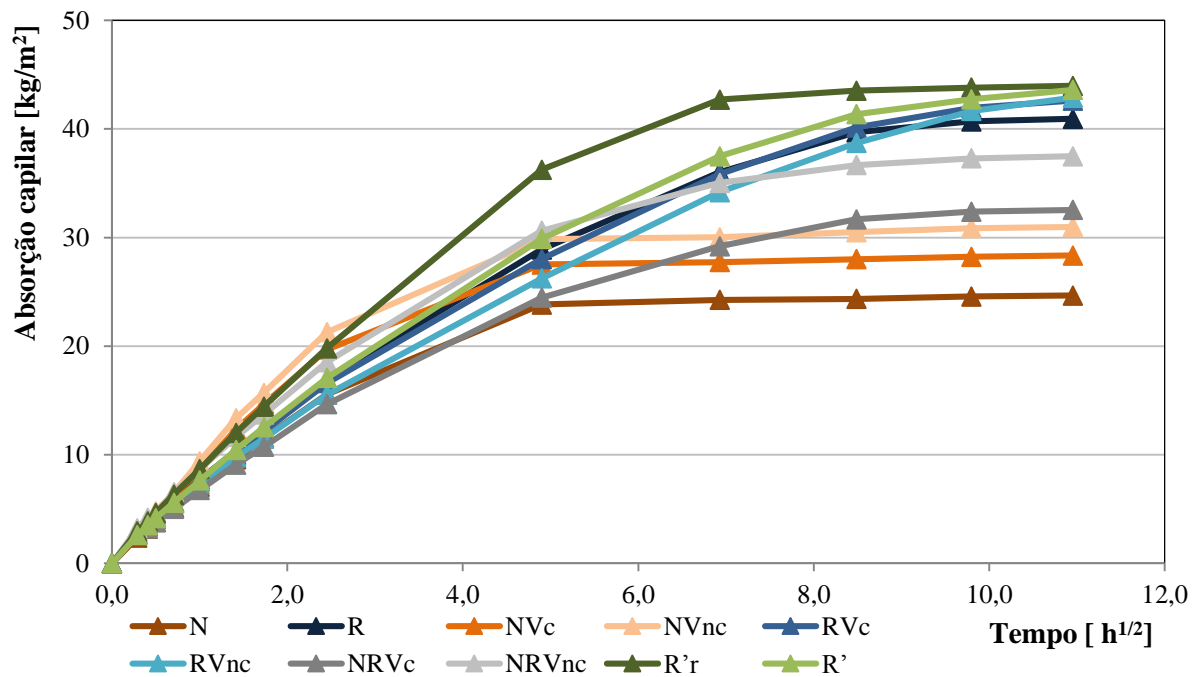
Através dos valores obtidos traça-se o gráfico da curva de absorção que exprime a quantidade de água absorvida por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo. Neste gráfico obtém-se o coeficiente de capilaridade (CC), expresso em  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ , que corresponde ao declive inicial da curva e traduz a velocidade com que a absorção de água ocorre nos instantes iniciais. Determinou-se também o valor assintótico (VA), expresso em  $\text{kg/m}^2$ , que traduz a quantidade máxima de água absorvida [Faria, 2004]. Este parâmetro não foi determinado para os “meios provetes”, uma vez que, não são conhecidas as suas dimensões.

Na figura 3.27 e 3.28 apresentam-se as curvas de absorção de água por capilaridade de todas as argamassas estudadas.



“Marcadores quadrados”: representam as curvas dos “meios” provetes;  
 Figura 3.27 - Curvas de absorção por capilaridade das argamassas ensaiadas





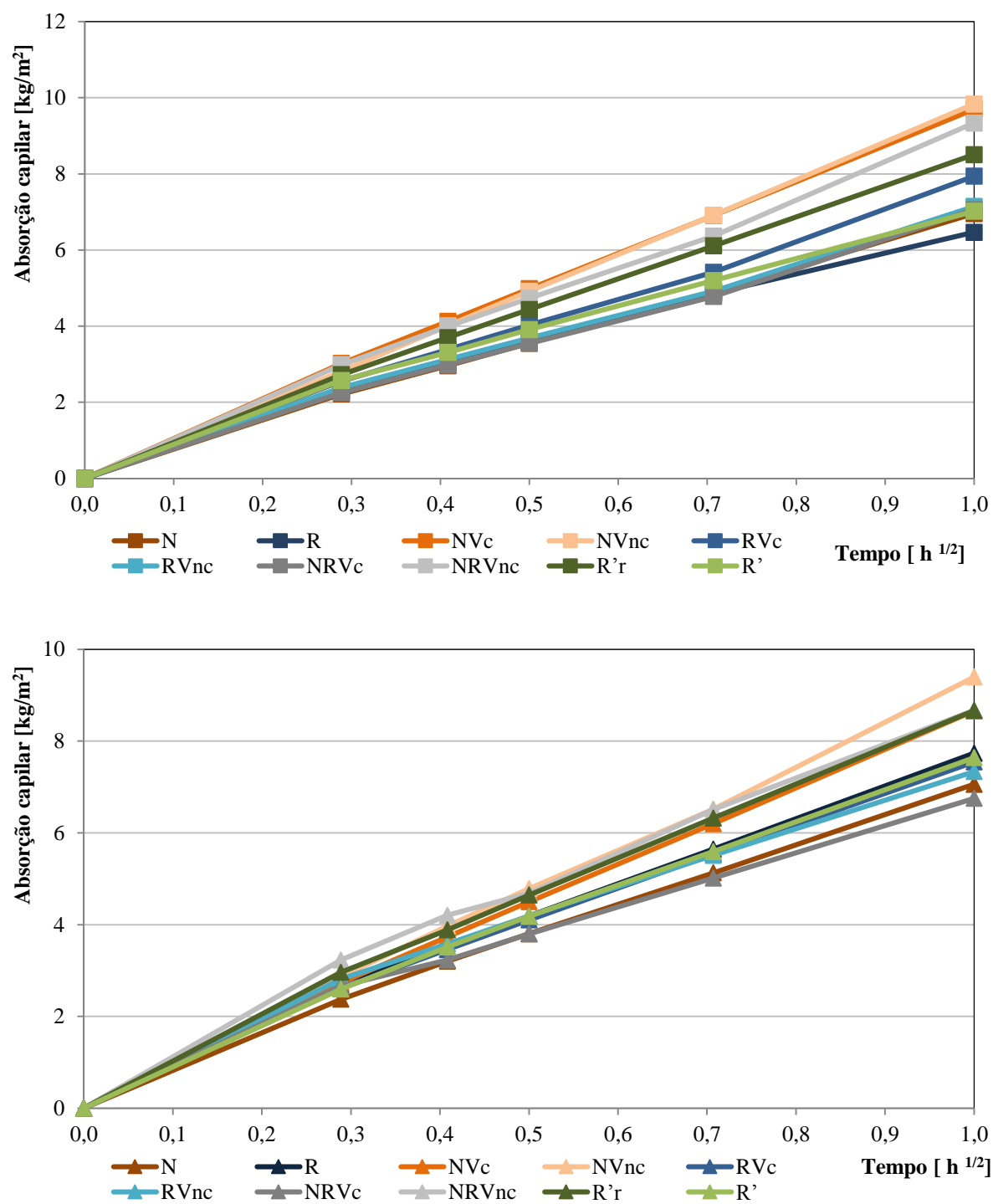
“Marcadores triangulares” representam as curvas dos provetes inteiros.

Figura 3.28 - Curvas de absorção por capilaridade das argamassas ensaiadas

Da análise da figura 3.27 e 3.28 verifica-se que os “meios” provetes e os provetes inteiros apresentam a mesma ordem sequencial de máxima absorção de água por capilaridade (traduzida pelo VA). Esta sequência tem como limite inferior as argamassas com agregado fino normalizado (menor quantidade de água absorvida) e limite superior as argamassas com agregado fino reciclado (maior quantidade de água absorvida).

Verifica-se que a ordem sequencial de quantidade de água absorvida é, como esperado, diretamente proporcional à porosidade. Isto é, as argamassas de agregados normalizados (representadas pelas cores de laranja) apresentam as menores porosidades, as argamassas de agregados reciclados (representadas pelas cores de verde) exibem os maiores valores; e com mistura dos agregados (representados pelas cores cinzas) apresentam valores intermédios.

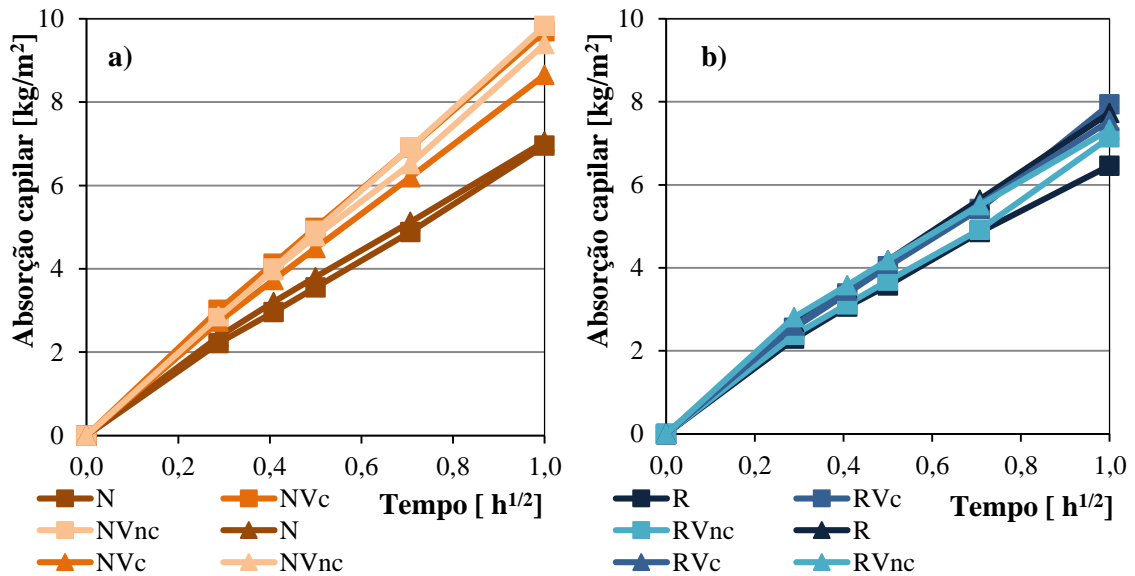
A figura 3.29 elaborada a partir das figuras 3.27 e 3.28 representa as curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas durante a primeira hora de ensaio; e na figura 3.30 indica-se em detalhe as argamassas com agregados normalizados e reciclados, durante a primeira hora de ensaio.



“Marcadores quadrados”: representam as curvas dos “meios” provetes;

“Marcadores triangulares” representam as curvas dos provetes inteiros.

Figura 3.29 - Curvas de absorção de água por capilaridade de todas as argamassas ensaiadas na primeira hora de ensaio



“Marcadores quadrados”: representam as curvas dos “meios” provetes;

“Marcadores triangulares” representam as curvas dos provetes inteiros.

a) Detalhe das argamassas com agregado normalizado; b) Detalhe das argamassas com agregado reciclado

Figura 3.30 – Curvas de absorção de água por capilaridade na primeira hora de ensaio

Através das figuras 3.29 e 3.30 verifica-se que as argamassas com agregados normalizados com cinzas volantes são as que apresentam maior declive, o que se traduz num maior valor de coeficiente de capilaridade. A argamassa constituída apenas por agregado normalizado (N) apresenta um declive relativamente semelhante ao apresentado pelas argamassas com agregados reciclados, o que indica que o uso de agregados reciclados (nos ensaios) não alterou a velocidade inicial de absorção de água por capilaridade.

A tabela 3.12 e as figuras 3.31 e 3.32 apresentam os valores médios e respetivos desvios-padrão do coeficiente de capilaridade (CC), da média de todos os provetes e os valores assintóticos (VA) dos provetes inteiros. Os resultados individuais encontram-se no Anexo I, tabelas I.19 e I.20.

Tabela 3.12 - Resultados médios do ensaio de absorção por capilaridade

Argamassas	Coeficiente de capilaridade [ $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ ]		Valor assintótico [ $\text{kg/m}^2$ ]	
	CC	DP	VA	DP
N	6,02	0,62	24,66	1,3
R	6,01	0,66	40,92	0,5
NVc	8,68	1,22	28,35	0,5
NVnc	9,25	0,95	30,98	0,9
RVc	6,43	0,17	42,61	0,6
RVnc	5,70	0,27	42,88	0,2
NRVc	5,58	0,12	32,54	0,9
NRVnc	7,36	0,41	37,48	0,3
R'r	7,75	0,16	43,96	0,2
R'	6,34	0,49	43,60	0,5

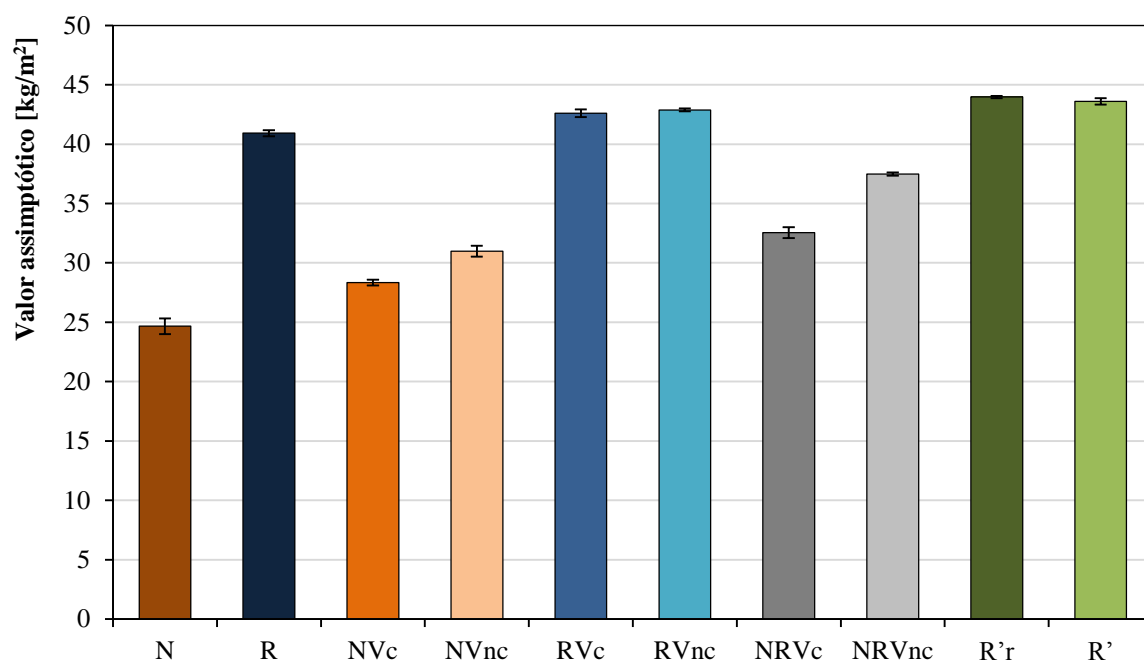


Figura 3.31 - Valores médios e desvios-padrão do valor assintótico dos provetes inteiros

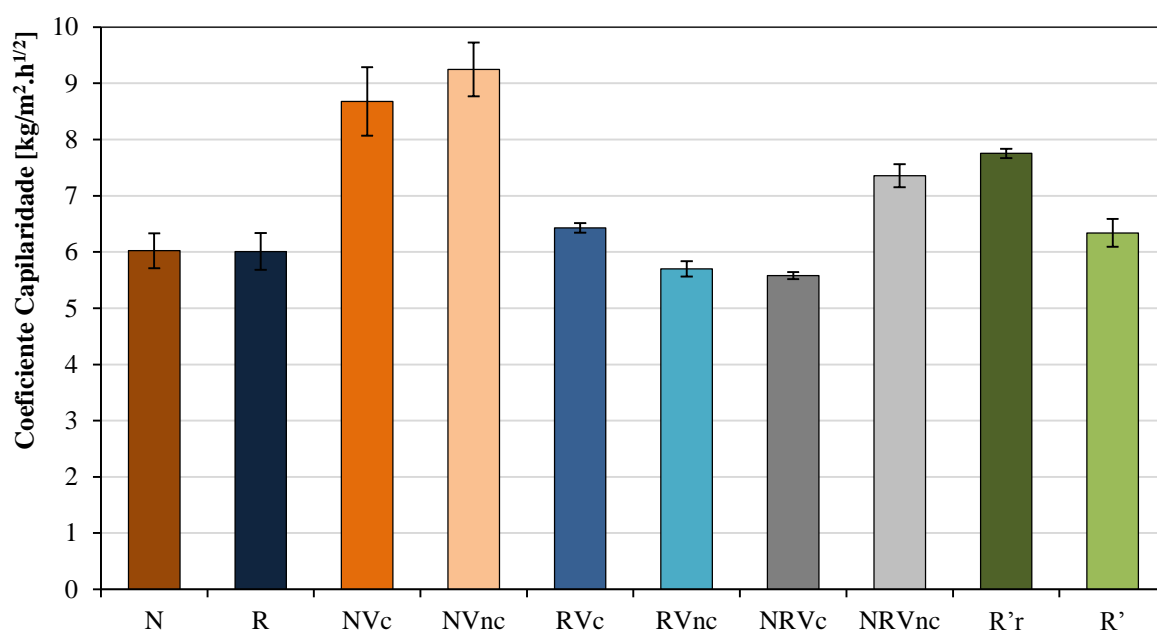


Figura 3.32 - Valores médios e respectivos desvios-padrão do coeficiente de capilaridade dos provetes ensaiados

Através da figura 3.31 verifica-se que as argamassas constituídas por agregados finos reciclados (incluindo as de 2ª fase) apresentam maiores quantidades de água absorvida comparativamente às argamassas com agregados normalizados. Em relação à presença de cinzas, constata-se que a sua presença traduz num aumento da quantidade de água absorvida por capilaridade em relação às argamassas de referência sem adições pozolânicas.

Relativamente ao coeficiente de capilaridade (CC), figura 3.32, verifica-se que as argamassas com agregados normalizados e cinzas volantes ostentam os maiores valores de CC. As argamassas de 2ª fase apresentam uma maior velocidade de absorção inicial relativamente à argamassa de referência (R).

### 3.7.4. Secagem

O procedimento do ensaio de secagem foi baseado no Test No. II.5 “Evaporation curve” da RILEM (1980) mas sem a impermeabilização dos provetes. Este ensaio permite avaliar a facilidade com que o material perde a água absorvida e inicia-se imediatamente após a conclusão do ensaio de capilaridade, correspondendo a última pesagem do ensaio de capilaridade à primeira do ensaio de secagem.

O ensaio decorreu na mesma sala climatizada do ensaio de capilaridade, com temperatura de  $20\pm 2^\circ\text{C}$  e humidade relativa de  $65\pm 5\%$ . Os provetes foram pesados numa balança de precisão de 0,001g em intervalos de tempo de 5, 10, 15, 30, 60, 180 e 360 minutos e a cada 24 horas até estabilizar<sup>5</sup> e colocados sobre a bancada na sala, figura 3.33.



Figura 3.33 – Provetes durante o ensaio de secagem

Com os dados deste ensaio é possível traçar a curva de secagem de cada provete, que traduz o teor de água ( $W_t$ ) [%] (quantidade de água existente em função da área do topo) em função do tempo [h], definido através da seguinte expressão 3.7 [Faria, 2012].

$$W_t = \frac{m_i - m_0}{m_0} \times 100 \text{ [%]} \quad (3.7)$$

sendo,

$m_i$  – Massa do provete no instante  $t_i$  [kg];

$m_0$  – Massa do provete seco [kg].

<sup>5</sup> Considera-se que o provete estabilizou, quando a diferença entre duas pesagens consecutivas com intervalo de 24 horas, for menor que 0,01% da massa do provete.

Através da análise do gráfico da curva de secagem determinou-se a taxa de secagem (TS), expressa em kg/m<sup>2</sup>, através do declive do troço reto (inicial) da curva de secagem em função do tempo, que traduz a velocidade da secagem inicial de cada argamassa. Este parâmetro não foi determinado para os “meios provetes”, uma vez que, não são conhecidas as suas dimensões (áreas de secagem). Além deste, é possível obter um segundo parâmetro, o índice de secagem (IS), que traduz a evolução global da secagem, através da seguinte expressão 3.8 [Faria, 2012].

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (t_i - t_{i-1}) \times \left( \frac{W_{t_{i-1}} + W_{t_i}}{2} \right)}{Q_{\max} \times t_f} \quad (3.8)$$

Em que :

$t_i$  – Tempo de ensaio “i” [h];

$t_f$  – Tempo final do ensaio [h];

$W_{t_i}$  – Teor de água do provete no instante  $t_i$  [%];

$Q_{\max}$  – Quantidade de água inicial, expressa em percentagem relativamente à massa seca

Nas figuras 3.34 e 3.35 são apresentadas as curvas de secagem de todas as argamassas ensaiadas.

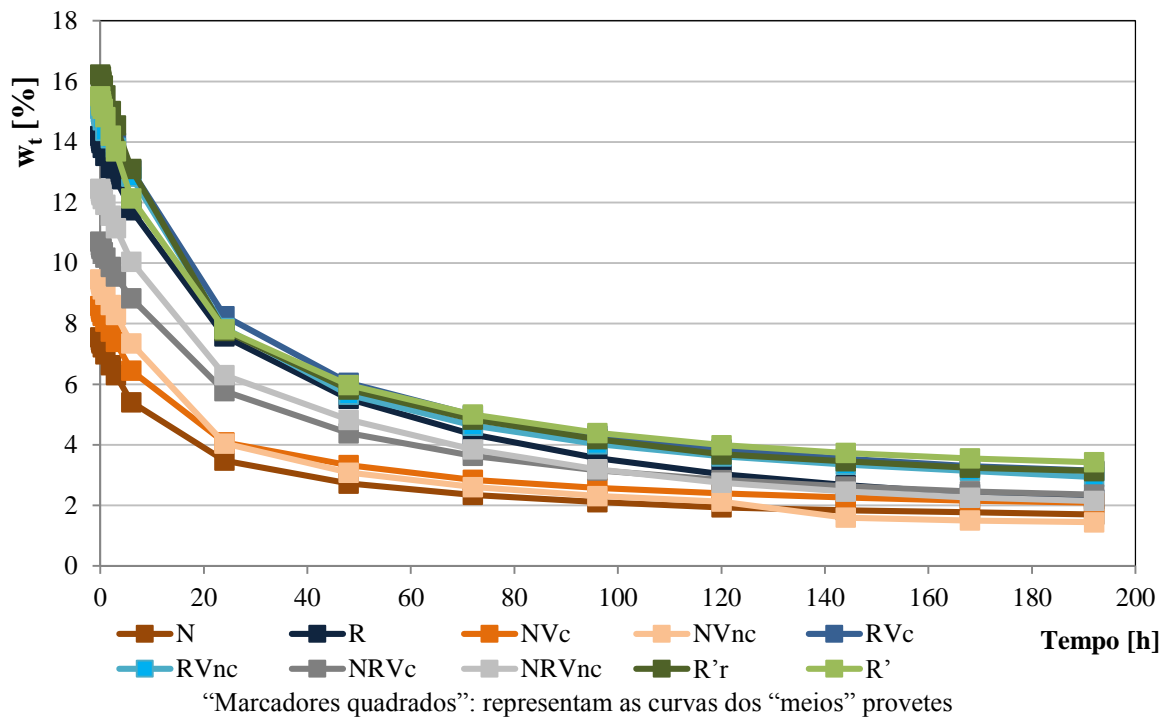
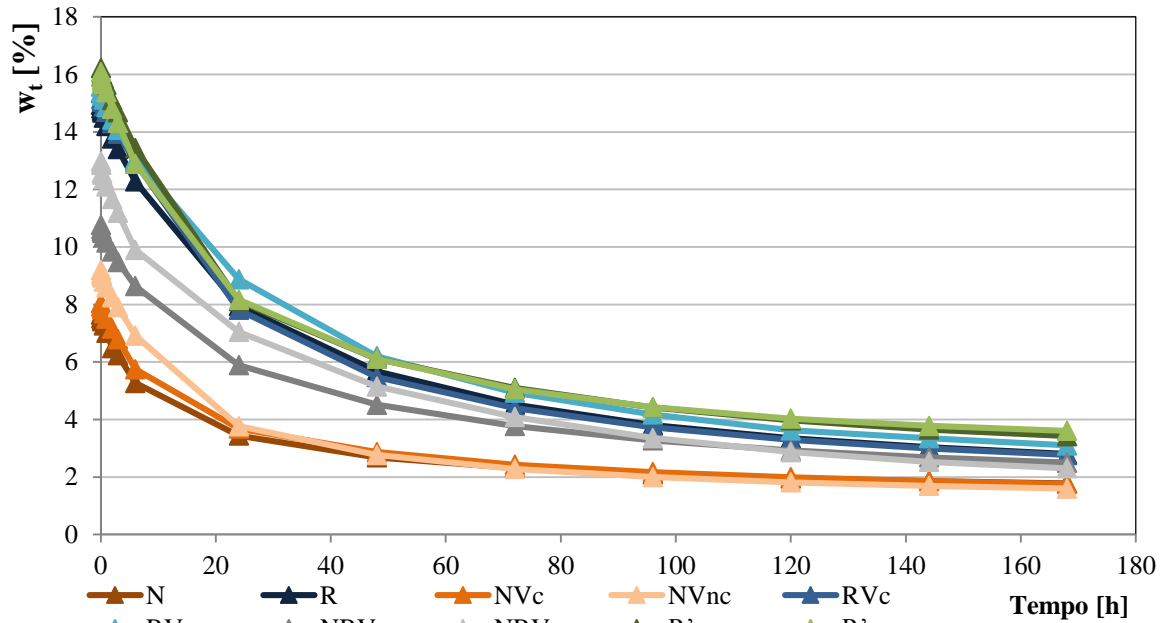


Figura 3.34 - Curvas de secagem das argamassas estudadas



“Marcadores triangulares” representam as curvas dos provetes inteiros

Figura 3.35 – Curvas de secagem das argamassas estudadas

Nas figuras 3.34 e 3.35 verifica-se diferentes “patamares”, semelhantes aos apresentados nas curvas de absorção capilar, de acordo com a composição das argamassas: no patamar inferior, a laranja, as argamassas com agregado fino normalizado; no patamar superior, azuis e verdes, as argamassas com agregados reciclados e no patamar intermédio, os cinzentos, que representam as argamassas com a mistura dos dois agregados.

Na tabela 3.13 e figuras 3.36 e 3.37 são apresentados os valores médios da taxa de secagem e do índice de secagem. Os resultados individuais de cada provete encontram-se no Anexo I, tabelas I.21 e I.22.

Tabela 3.13 – Resultados médios e desvios-padrão do ensaio de secagem

Argamassas	Índice de secagem [-]		Taxa de secagem [kg/(m <sup>2</sup> .h)]	
	IS	DP	TS × 10 <sup>-2</sup>	DP
N	0,33	0,03	6,76	0,48
R	0,33	0,02	6,80	0,49
NVc	0,34	0,02	6,74	0,59
NVnc	0,29	0,02	6,63	0,68
RVc	0,34	0,02	5,71	0,80
RVnc	0,34	0,01	6,04	0,62
NRVc	0,36	0,02	5,40	0,72
NRVnc	0,33	0,01	6,92	0,80
R'r	0,33	0,01	8,20	0,31
R'	0,35	0,00	9,14	0,29

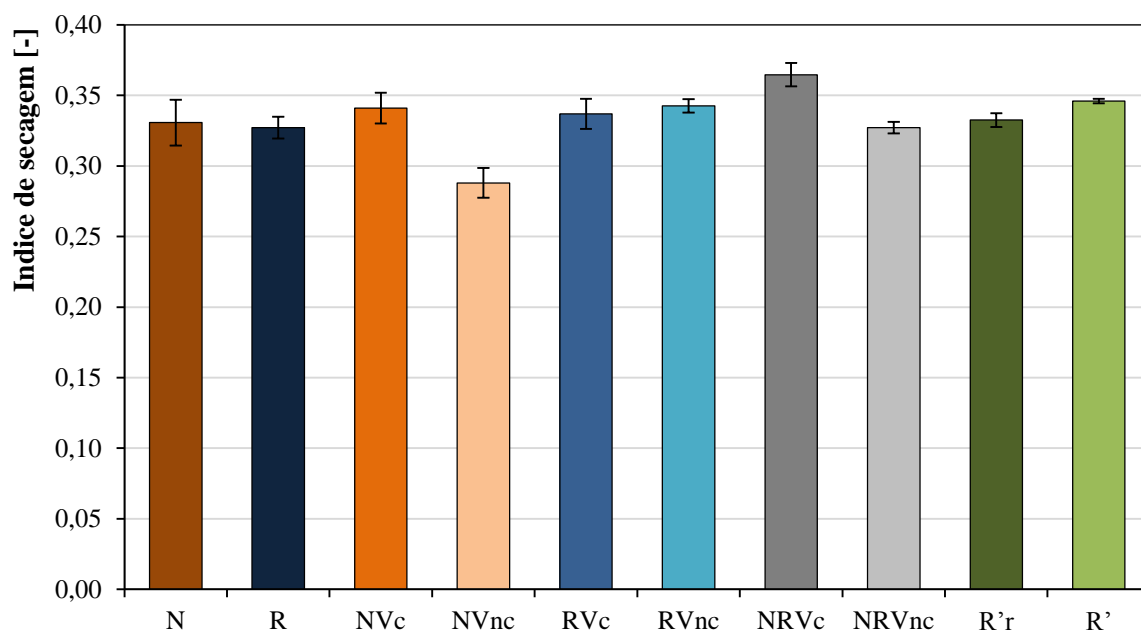


Figura 3.36 – Valores médios e respectivos desvios-padrão do índice de secagem

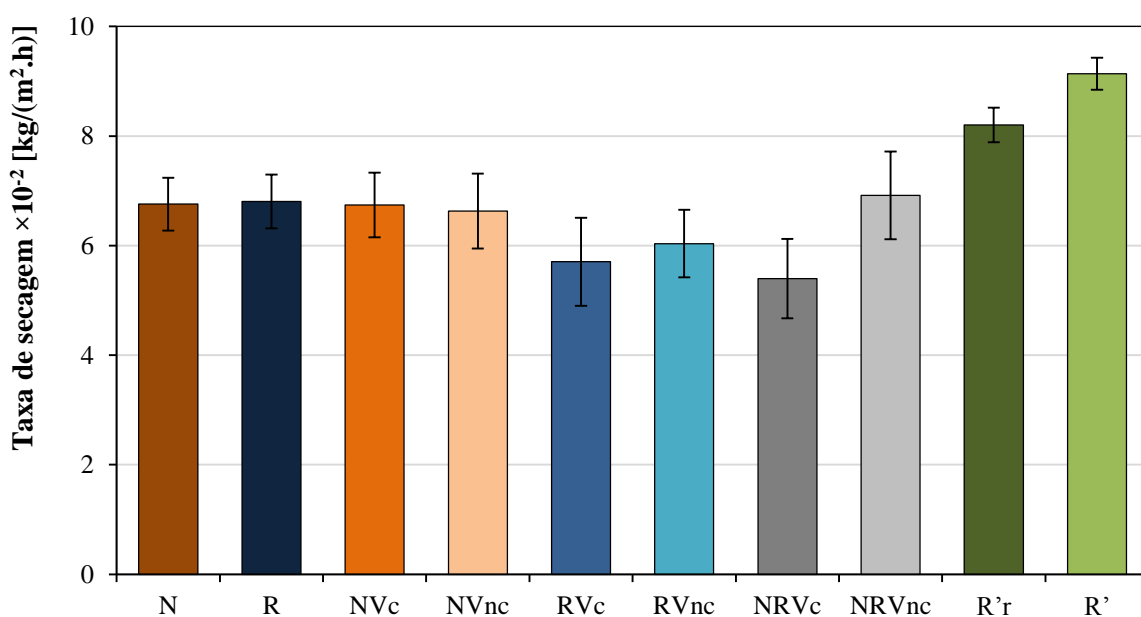


Figura 3.37 - Valores médios e respectivos desvios-padrão da taxa de secagem

Na figura 3.36 verifica-se que o valor do índice de secagem é relativamente constante em todas as argamassas.

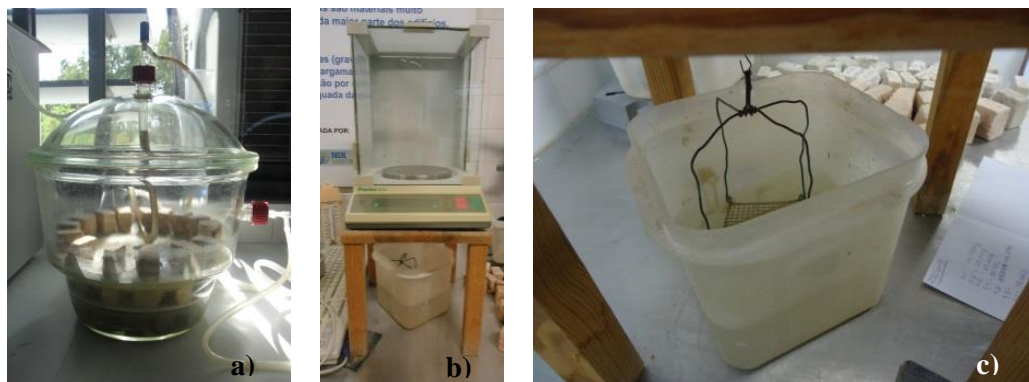
Quanto à taxa de secagem, figura 3.37, observa-se que o valor não varia de forma significativa entre as argamassas. As argamassas com agregados de 2ª fase apresentam valores de taxa de secagem relativamente superiores face à argamassa de referência.



### 3.7.5. Massa volúmica aparente, massa volúmica real e porosidade aberta

Os ensaios para determinação das massas volúmicas real e aparente, e da porosidade aberta foram realizados tendo por base a norma NP EN 1936 [IPQ, 2008]. Os equipamentos e procedimentos de ensaio foram comuns em ambos os ensaios, diferindo apenas no tratamento dos dados obtidos (expressões segundo as quais se calcularam os resultados).

Para este ensaio foram utilizadas as extremidades resultantes dos meios provetes decorrentes do ensaio de resistência à compressão. Antes de colocar os provetes no interior do exsiccador, foram determinadas as massas secas ( $M_1$ ) numa balança com precisão de 0,001g. Em seguida, os provetes foram colocados no interior do exsiccador, ligado a uma bomba de vácuo, que reduz a pressão no interior deste até 2667 Pa. Os provetes são mantidos a esta pressão durante 24 horas (com a bomba ligada), figura 3.38 a). Após esse tempo, coloca-se água na proveta que, por sua vez, lentamente encaminha água por intermédio de uma válvula até ao exsiccador, até os provetes ficarem totalmente imersos. Os provetes foram mantidos em imersão total durante 24 horas e sujeitos às condições de pressão anteriormente definidas. Após esse tempo a bomba é desligada, e restaurou-se a pressão atmosférica no interior do exsiccador, abrindo a válvula, ficando os provetes imersos a essa pressão durante as 24 horas seguintes. Ao final desse tempo procedeu-se à pesagem imersa dos provetes ( $M_2$ ), suspensos num suporte acoplado na parte inferior da balança colocado dentro de água, figura 3.38 b). Retiraram-se os provetes da água, colocaram-se durante uns instantes sobre um pano húmido, eliminando o excesso de água, e determinou-se a massa saturada ( $M_3$ ), figura 3.38 c).



a) Provetes em imersão total no exsiccador; b) pesagem dos provetes; c) Pesagem hidrostática

Figura 3.38 – Ensaio de determinação da massa volúmica

Com os resultados obtidos determinou-se o valor da massa volúmica aparente (MVA), da massa volúmica real (MVR) e da porosidade aberta (PA), determinadas através das expressões 3.9, 3.10 e 3.11 respetivamente.

- Massa Volúmica Aparente (MVA)

$$MVA = \frac{M_1}{M_3 - M_2} \times 10^3 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (3.9)$$

- Massa Volúmica Real (MVR):

$$MVR = \frac{M_1}{M_1 - M_2} \times 10^3 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (3.10)$$

- Porosidade aberta (PA):

$$PA = \frac{M_3 - M_1}{M_3 - M_2} \times 100 \text{ [%]} \quad (3.11)$$

sendo,

$M_1$  – Massa seca do provete [g];

$M_2$  – Massa hidrostática do provete [g];

$M_3$  – Massa saturada do provete [g].

Na tabela 3.14, apresentam-se os valores médios obtidos das massas volúmicas real e aparente e porosidade aberta para cada tipo de argamassa ensaiada. Os resultados individuais encontram-se no Anexo I, tabela I.24.

Tabela 3.14 - Valores médios e desvios-padrão da massa volúmica real e aparente e da porosidade aberta

Argamassas	MVR [kg/m <sup>3</sup> ]		MVA [kg/m <sup>3</sup> ]		PA [%]	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP
N	2421,19	17,84	2026,09	11,82	16,32	0,18
R	2417,96	6,90	1738,63	11,81	28,10	0,30
NVc	2429,55	67,60	2073,69	45,24	17,04	4,30
NVnc	2452,68	14,84	2005,78	30,17	18,22	0,79
RVc	2346,54	56,65	1733,36	57,65	26,07	4,14
RVnc	2381,64	8,99	1702,54	1,45	28,51	0,21
NRVc	2498,64	52,82	1903,56	21,75	23,79	2,18
NRVnc	2307,58	9,21	1806,19	82,71	21,73	3,27
R'r	2342,16	27,07	1693,06	11,61	27,71	0,72
R'	2379,47	35,56	1704,93	12,00	28,34	0,70

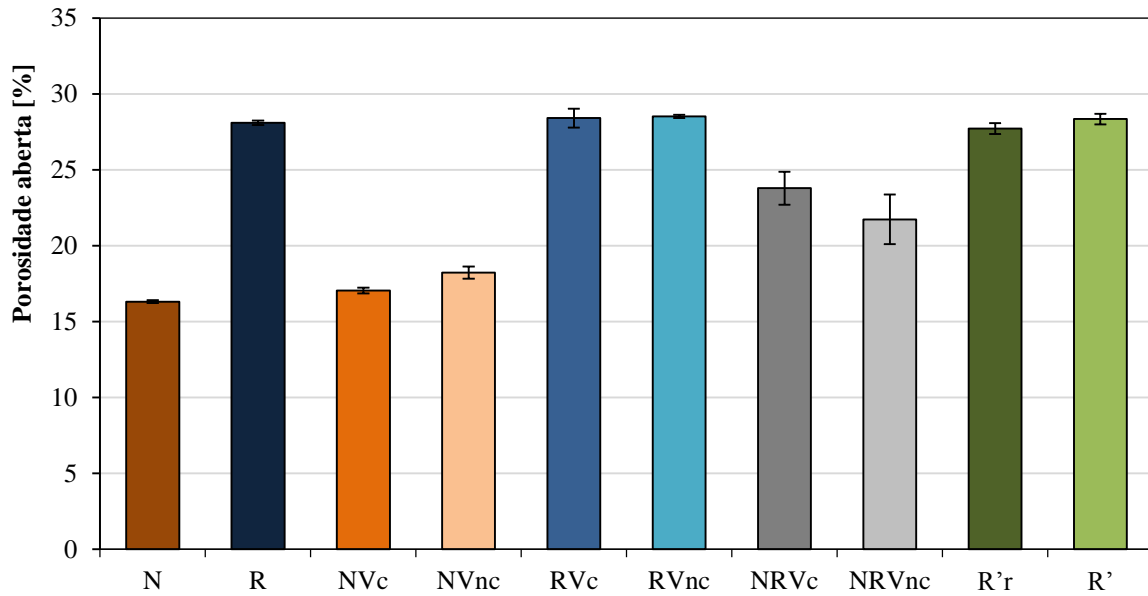


Figura 3.39 – Valores médios da porosidade aberta

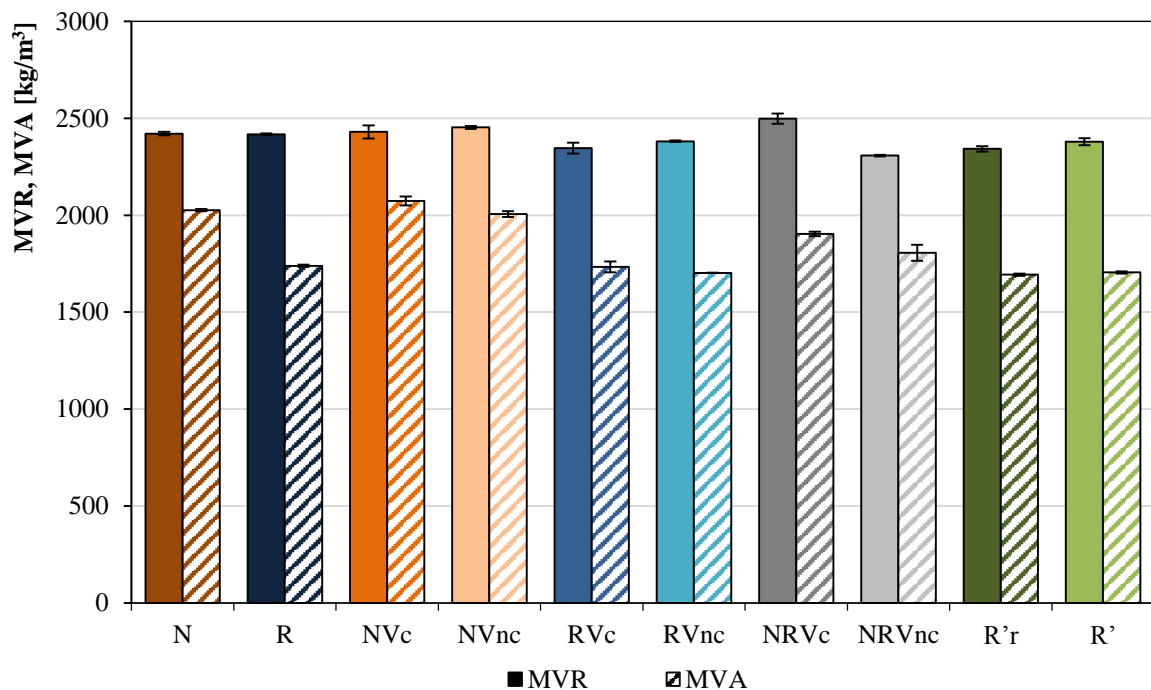


Figura 3.40 – Valores médios da massa volúmica real e aparente

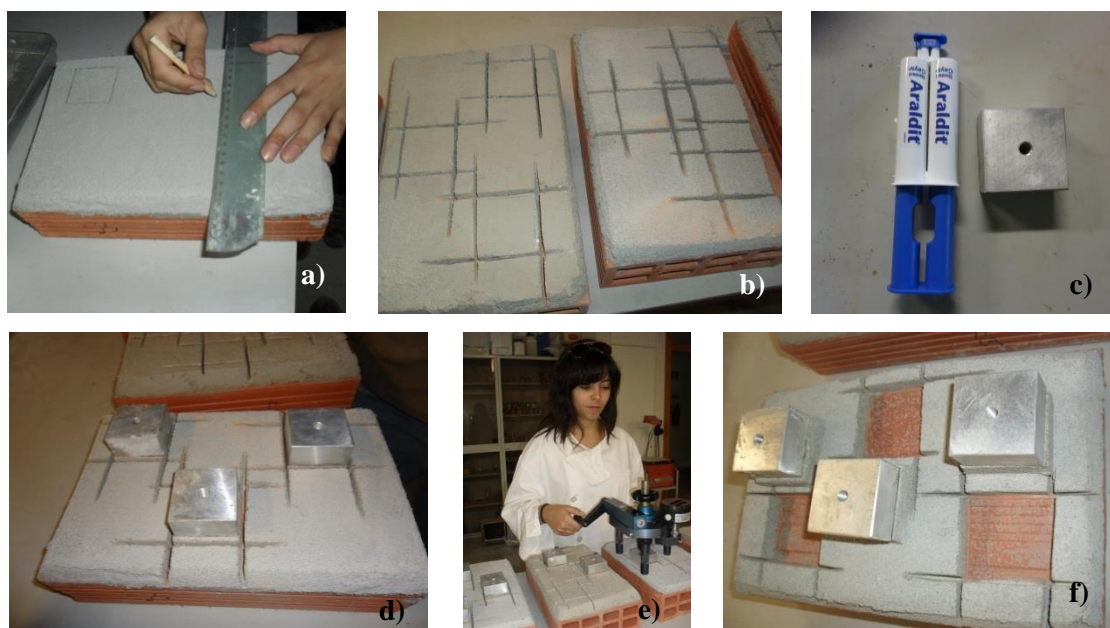
Da análise da figura 3.39 verifica-se que a porosidade aberta é superior em todos os provetes com agregados fino reciclado. A adição de cinzas aumentou ligeiramente a porosidade de todas as argamassas.

Na figura 3.40 constata-se que a massa volúmica real, que traduz uma massa sem vazios, não apresenta diferenças significativas em todas as argamassas. Contudo, relativamente à massa volúmica aparente, que contabiliza o volume de poros, as argamassas com agregado fino reciclado apresentam valores inferiores comparativamente às argamassas com agregado normalizado.

### **3.7.6. Aderência ao suporte**

A aderência ao suporte é uma característica que caracteriza o bom comportamento dos revestimentos, pois condiciona a durabilidade, a capacidade de impermeabilização, bem como a resistência à fendilhação [Veiga, 1998 citado por Neno, 2010]. Os movimentos diferenciais entre o suporte e a argamassa podem provocar fendilhação no reboco caso o material seja muito rígido, sendo assim importante avaliar a sua compatibilidade.

Este ensaio realizou-se tendo como base a norma EN 1015-12 [CEN,1999b]. Após os provetes serem submetidos às condições de cura idênticas às dos provetes prismáticos, demarcaram-se as áreas de teste na face dos provetes figura 3.41 a). Com recurso a uma rebarbadora executaram-se os cortes (3 entalhes quadrados com 5 cm de largura) figura 3.41 b). Em seguida, as pastilhas metálicas foram coladas, com uma cola de alta resistência de duas componentes da marca “Araldite”, figura 3.41 c), sobre as zonas delimitadas pelas incisões, deixando-se secar durante um período mínimo de 48h, figura 3.41 d). Aplicou-se o dinamómetro digital de 2,5 kN de força máxima e precisão de 0,01N, sobre cada uma das pastilhas em análise, e após verificação do valor zero no manómetro rodou-se o manípulo impondo uma força constante até rotura, figura 3.41 e) e f). Nesse instante é regista-se o valor da força máxima exercida e avaliação do tipo de rotura obtida.



a) Demarcação dos limites dos entalhes; b) Provette após as incisões dos entalhes; c) Acessórios necessários à realização do ensaio; d) Colagem das pastilhas; e) Aparelho de arrancamento das pastilhas; f) Aspeto final dos provetes, após a realização do ensaio

Figura 3.41 – Ensaio de aderência ao suporte

Este ensaio tem como objetivo a determinação da força necessária para provocar o arrancamento por tração de uma área da argamassa aplicada sobre o suporte. No presente trabalho experimental verificaram-se dois tipos de rotura:

- Rotura adesiva - ocorre na interface entre a argamassa e o suporte;
- Rotura coesiva - ocorre no interior da argamassa, ou no interior do suporte

A tensão de aderência  $\sigma$  [MPa] é obtida através da expressão 3.12.

$$\sigma = \frac{F}{S} \text{ [MPa]} \quad (3.12)$$

sendo,

F – Força de rotura [N];

S – Área da pastilha [mm<sup>2</sup>] (S=1963mm<sup>2</sup>, no caso de uma pastilha circular).

Neste ensaio, utilizaram-se pastilhas quadradas com o objetivo de facilitar a execução das incisões nas argamassas em substituição das pastilhas circulares. Visto o dinamómetro estar programado para a utilização de pastilhas circulares foi realizada uma conversão dos resultados obtidos para a área das pastilhas quadradas, através da seguinte expressão 3.13.

$$\sigma' = \sigma \times \frac{A_2}{A_1} \text{ [MPa]} \quad (3.13)$$

sendo,

A<sub>1</sub> – Área da pastilha quadrada (A<sub>1</sub> = 50×50=2500 mm<sup>2</sup>);

A<sub>2</sub> – Área da pastilha circular (A<sub>2</sub> = 1963 mm<sup>2</sup>);

$\sigma'$  – Tensão de aderência [MPa].

A tabela 3.15 apresenta os resultados da tensão e do tipo de rotura obtidos no ensaio de aderência ao suporte.

Tabela 3.15 – Resultados médios do ensaio de aderência ao suporte

Argamassa	Pastilha	Tensão [MPa]		Tipologia de rotura	$\sigma_{\text{méd}}$ [Mpa]
		$\sigma$	$\sigma'$		
N	1	0,4	0,31	Adesiva	0,31
NVnc	2	0,35	0,24	Adesiva	0,24
NRVnc	1	0,37	0,26	Adesiva	0,26

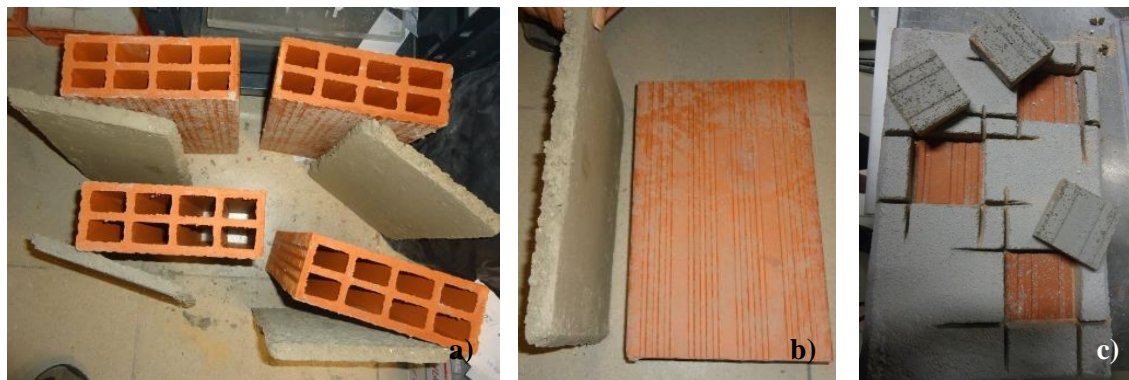
A execução deste ensaio depende de algumas variáveis que podem alterar os resultados, nomeadamente as condições de humidade do tijolo, a aplicação manual da argamassa no tijolo mas principalmente a maneira com que se manobra o aparelho de arrancamento manual.

Nos provetes denominados por R, RVc, RVnc e NRVc, durante o tempo de cura, ocorreu o destacamento completo da argamassa do tijolo cerâmico pela interface suporte-argamassa, figuras

3.42 a) e b). Este facto pode ter acontecido devido à retração verificada nestas argamassas, diminuindo a aderência.

No provete NVc, durante a fase de corte dos entalhes (que delimitam a área de colagem das pastilhas), deu-se o destacamento de todas as zonas de colagem das pastilhas metálicas pelo mesmo tipo de rotura, figura 3.42 c). Estas ocorrências inviabilizaram a realização do ensaio nestes provetes, como verificado na tabela 3.15.

Uma solução possível para aumentar a aderência pode passar pela utilização de um chapisco.



a) Provetes que sofreram o destacamento durante a cura; b) Pormenor do destacamento da argamassa ao suporte; c) Destacamento após o corte dos entalhes antes da colagem das pastilhas

Figura 3.42 – Destacamentos da argamassa

### 3.8. Síntese dos resultados

Na tabela 3.16 são apresentados os resultados médios de todos os ensaios realizados durante toda a campanha experimental.

Tabela 3.16 – Síntese dos resultados obtidos na campanha experimental

Argamassas	N	R	NVc	NVnc	RVc	RVnc	NRVc	NRVnc	R'r	R'
Esp [%]	69,3	--	70,3	75,0	--	--	54,3	68,3	70,0	67,8
a/l [-]	0,66	0,89	0,66	0,77	0,85	0,86	0,54	0,85	0,89	0,89
E <sub>din</sub> [MPa]	2355,9	1857,2	2479,2	2455,6	1822,8	8038,8	2054,4	8579,9	7896,9	8508,9
Rc [MPa]	15,66	10,83	12,16	11,75	8,81	8,27	8,73	6,15	5,67	9,15
Rf [MPa]	3,01	2,68	3,40	1,96	2,28	2,24	2,75	1,62	2,37	2,57
MVA [kg/m <sup>3</sup> ]	2026,09	1738,63	2073,69	2005,78	1732,12	1702,54	1903,56	1806,19	1693,06	1704,93
MVR [kg/m <sup>3</sup> ]	2421,19	2417,96	2429,55	2452,68	2348,93	2381,64	2498,64	2307,58	2342,16	2379,47
PA [%]	16,32	28,10	17,04	18,22	28,59	28,51	23,79	21,73	21,71	28,34
VA [kg/m <sup>2</sup> ]	24,66	40,92	28,35	30,98	42,61	42,88	32,54	37,48	43,96	43,60
CC[kg/(m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> )]	6,02	6,01	8,68	9,25	6,43	5,70	5,58	7,36	7,75	6,34
TS[kg/(m <sup>2</sup> .h)]	0,0676	0,0680	0,0674	0,0663	0,0571	0,0604	0,0540	0,00692	0,0820	0,0914
IS [-]	0,33	0,33	0,34	0,29	0,34	0,34	0,36	0,33	0,33	0,33

## **Capítulo 4**

### **DISCUSSÃO DE RESULTADOS**

#### **4.1. Considerações iniciais**

Neste capítulo, são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios realizados durante a presente campanha experimental (apresentada no capítulo 3).

Os resultados são apresentados e analisados de forma a determinar a influência dos agregados, das adições pozolânicas, do retardador de presa e da mistura dos agregados, no comportamento das argamassas no estado fresco (quanto à influência da água de amassadura) e no estado endurecido (quanto às resistências mecânicas e comportamento face à ação da água).

No final do capítulo são realizadas comparações entre os resultados alcançados no presente trabalho e por outros investigadores que desenvolveram estudos similares em argamassas, referidos na secção 2.4. Além destes, também são analisadas qualitativamente as tendências obtidas pelos autores dos trabalhos inseridos na mesma linha de investigação que o presente trabalho experimental, apresentados na secção 2.5.

#### **4.2. Características das argamassas no estado fresco**

##### **4.2.1. Consistência**

A quantidade de água adicionada às argamassas durante a amassadura depende essencialmente da superfície específica dos agregados, tipo de ligante, traço utilizado, entre outros fatores intrínsecos à utilização prevista da argamassa (trabalhabilidade/consistência).

A estrutura porosa das argamassas é originada pela água em excesso que quando evapora, o espaço anteriormente ocupado pela água passa a ser ocupado pelo ar. Assim sendo, a água é a responsável

pela interligação e conexão dos poros com o exterior (porosidade). Deste modo, a porosidade permite determinar a percentagem de vazios que existe no interior da argamassa. Por este motivo, efetuou-se o cruzamento entre a porosidade aberta e a relação água/ligante.

Na figura 4.1 analisa-se a relação água/ligante a porosidade aberta das argamassas de referência de agregado fino normalizado (N) e agregado fino reciclado (R).

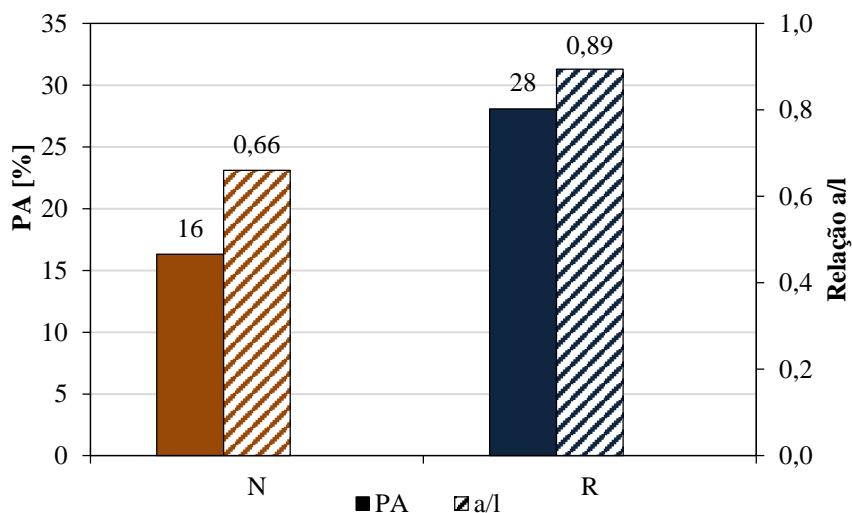


Figura 4.1 – Comparação entre a relação água/ligante e a porosidade aberta das argamassas com agregado fino normalizado (N) e agregado fino reciclado (R)

Através da figura 4.1 verifica-se que as argamassas com agregado fino reciclado apresentam maior porosidade, relativamente às argamassas de agregado normalizado, como consequência da maior quantidade de água. Além disto, os valores superiores de porosidade devem-se também à forma angular destes agregados, em relação aos normalizados que apresentam formas arredondadas e uniformes [Lanas 2003; 2004].

Este facto é também verificado noutros estudos sobre argamassas com agregados reciclados, nomeadamente F. Lima [Lima, 2005], L. Miranda [Miranda, 2000], V. Corinaldesi [Corinaldesi, 2009], G. Moriconi et al [Moriconi, 2009] e M. Oliveira [Oliveira, 2011], onde a incorporação de agregados reciclados exigiu uma maior quantidade de água para se atingir a consistência pretendida. Segundo M. Oliveira [Oliveira, 2011] este facto deve-se à presença de partículas finas, aumentando a superfície específica global e também a porosidade.

Sendo os agregados reciclados muito frágeis, ao serem submetidos ao processo de reciclagem, produzem uma quantidade considerável de material pulverulento. É possível verificar nas tabelas I.1 a I.4 do Anexo I que o agregado fino reciclado contém grandes quantidades de partículas finas: cerca de 2% da amostra é constituída por partículas com dimensões inferiores a 0,075mm (refugo). Estes apresentam cerca de 20 vezes mais partículas finas do que o agregado fino normalizado. Sabendo que areias mais finas têm globalmente maior superfície específica, é maior a quantidade



de água de amassadura necessária, logo o excesso de água acrescido (evaporável) traduz num aumento de poros [Rato, 2006].

Constata-se assim, a tendência que uma maior quantidade de água implica maior porosidade, tal como verificado também no estudo desenvolvido por X. Chen [Chen, 2013].

Na figura 4.2 apresenta-se a relação entre a relação água/ligante com a porosidade das argamassas com agregado fino normalizado (N), com cinzas volantes conformes (NVc) e não conformes (NVnc).

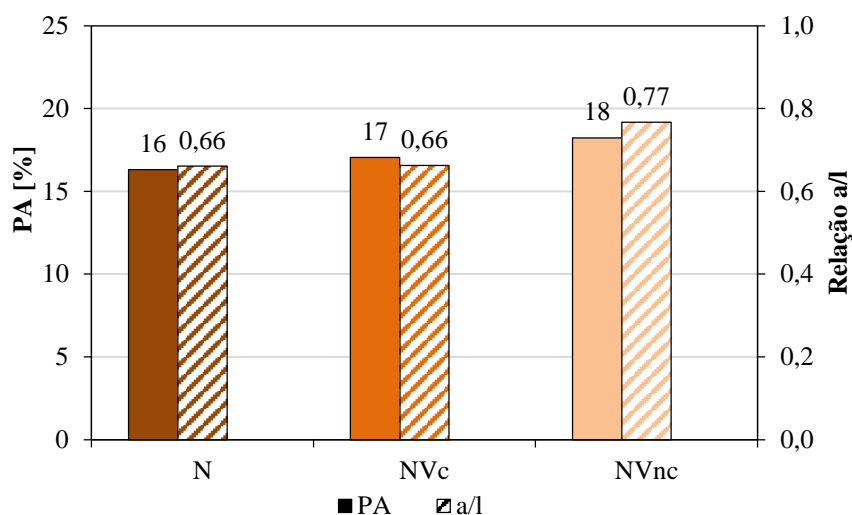


Figura 4.2 - Comparação entre a relação água/ligante e porosidade aberta das argamassas com agregado fino normalizado (N) com cinzas volantes conformes (NVc) e não conformes (NVnc)

Na figura 4.2 constata-se que nas argamassas com cinzas volantes conformes, a relação a/l mantém-se constante, o que justifica a pequena variação dos valores da porosidade. Relativamente às argamassas com cinzas volantes não conformes, foi necessária uma maior quantidade de água para a mesma trabalhabilidade, o que conduz a um aumento da porosidade aberta relativamente à argamassa sem cinzas (N).

Verifica-se assim, que a presença de cinzas aumenta ligeiramente a porosidade em ambas as argamassas. Deste modo, supõe-se que as cinzas preenchem os vazios existentes criando outros (contrabalançando os que reduziram). Para compreender este facto seria necessário determinar a granulometria e a superfície específica do cimento e das cinzas volantes.

Assim, a presença de cinzas volantes provoca um aumento de espaços vazios, contribuindo para um aumento da porosidade. Segundo o trabalho desenvolvido por Zhuqing Yu [Yu, 2013] a porosidade das argamassas é superior com a presença de cinzas do que na argamassa de referência sem cinzas. No entanto, o autor afirma que a relação a/l tem maior influência no aumento da porosidade do que a incorporação das cinzas.

Na figura 4.3 estabelece-se a relação entre a relação água/ligante com a porosidade das argamassas com agregado fino reciclado (R) com cinzas volantes conformes (RVc) e não conformes (RVnc).

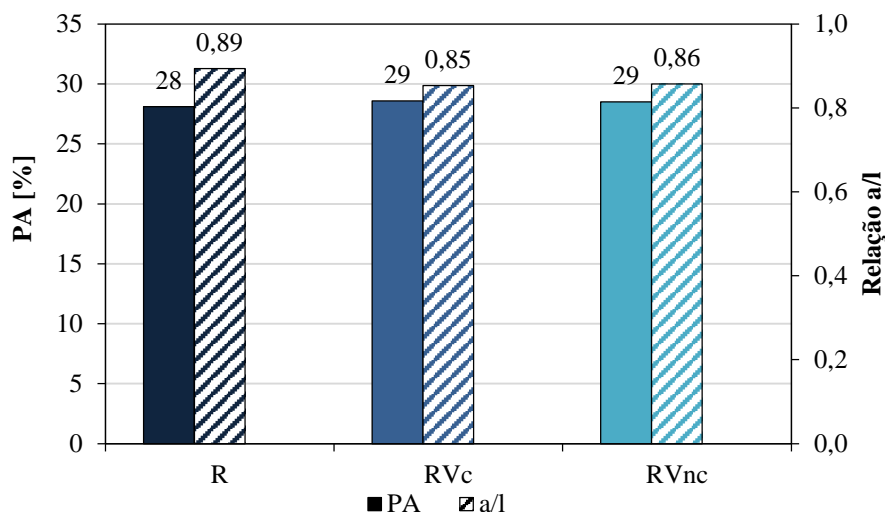


Figura 4.3 - Relação entre a relação água/ligante e porosidade aberta das argamassas com agregado fino reciclado (R) com cinzas volantes conformes (RVc) e não conformes (RVnc)

Na figura 4.3 observa-se que a presença de cinzas volantes conformes e não conformes nas argamassas com agregado fino reciclado, conduz a um ligeiro aumento da porosidade aberta em relação à argamassa sem cinzas volantes.

A quantidade de água utilizada nestas argamassas não apresenta diferenças significativas. É de referir que nas argamassas de agregado fino reciclado não foi possível efetuar o ensaio de espalhamento, devido à presa quase instantânea. A heterogeneidade química presente nos agregados reciclados fez com que a água que iria inferir trabalhabilidade à mistura tenha sido consumida em reações químicas, o que limitou fortemente a consistência pretendida. Esta situação é ainda mais acentuada devido à presença de partículas angulosas, que diminuem a consistência da mistura.

A superfície específica das partículas angulares é superior às partículas de grão arredondado, o que obriga ao emprego de maior quantidade de água durante a amassadura da pasta, contribuindo de forma negativa para a sua resistência e suscetibilidade à fendilhação [Margalha, 2010].

### 4.3. Características das argamassas endurecidas

#### 4.3.1. Resistências mecânicas

As resistências mecânicas são os parâmetros que definem a capacidade resistente de uma argamassa. Estas propriedades dependem fundamentalmente da relação água/cimento, do processo de hidratação, da porosidade, da dosagem de ligante e da granulometria das matérias-primas (granulometria, forma, textura). A grande influência da relação água/cimento deve-se ao facto desta

determinar a porosidade da pasta de cimento endurecida; menores porosidades, conduzem, normalmente, a maiores resistências [Sidnei Lourenci, 2003].

A porosidade é uma das principais características responsáveis pelo comportamento das argamassas. Sendo as resistências mecânicas fortemente influenciadas por esta característica, interessa avaliar e comparar as suas tendências. Na figura 4.4 relaciona-se a porosidade aberta com as resistências mecânicas das argamassas de referência, de agregado fino normalizado (N) e de agregado fino reciclado (R).

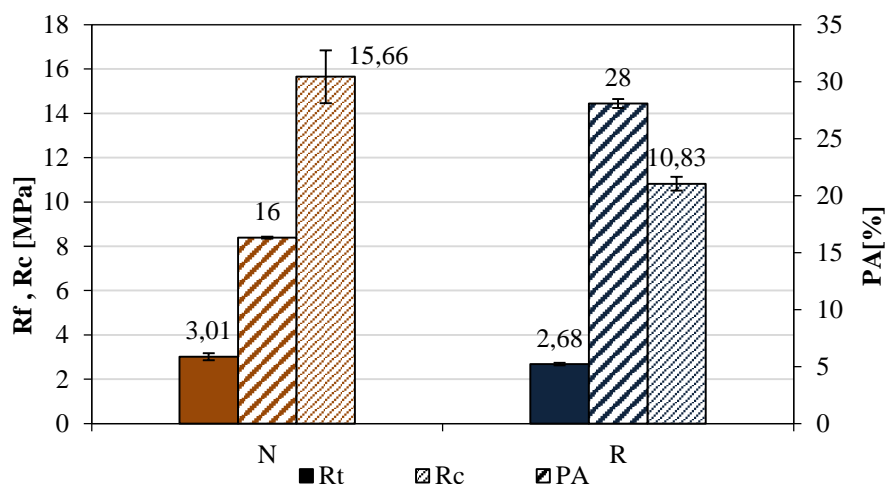


Figura 4.4 – Relação entre as resistências mecânicas e porosidade aberta das argamassas com agregado fino normalizado (N) e agregado fino reciclado (R)

Na figura 4.4 verifica-se que os agregados reciclados apresentam maiores porosidades e consequentemente menores resistências mecânicas, em relação aos agregados normalizados. Este facto era expectável, uma vez que as resistências mecânicas das argamassas dependem do adequado preenchimento das mesmas pelas partículas do agregado, contribuindo assim, para uma maior coesão e um consequente aumento da compacidade (e menores porosidades).

Estes resultados coadunam-se com trabalhos de investigação realizados no mesmo âmbito, entre os quais, F. Lima [Lima, 2005], A. Barra [Barra, 2011] e G. Moriconi [Moriconi, 2009]. No entanto, são contraditórios com L. Miranda [Miranda, 2000] e M. Braga et al [Braga, 2012], os quais obtiveram um acréscimo das resistências nas argamassas com agregados reciclados. Possivelmente estes resultados contraditórios devem-se aos diferentes métodos utilizados e, principalmente, às diferentes composições dos agregados reciclados.

Na figura 4.5 apresenta-se a evolução das resistências mecânicas à tração por flexão e compressão com a porosidade das argamassas com agregado fino normalizado (N) com cinzas volantes conformes (NVc) e não conformes (NVnc).

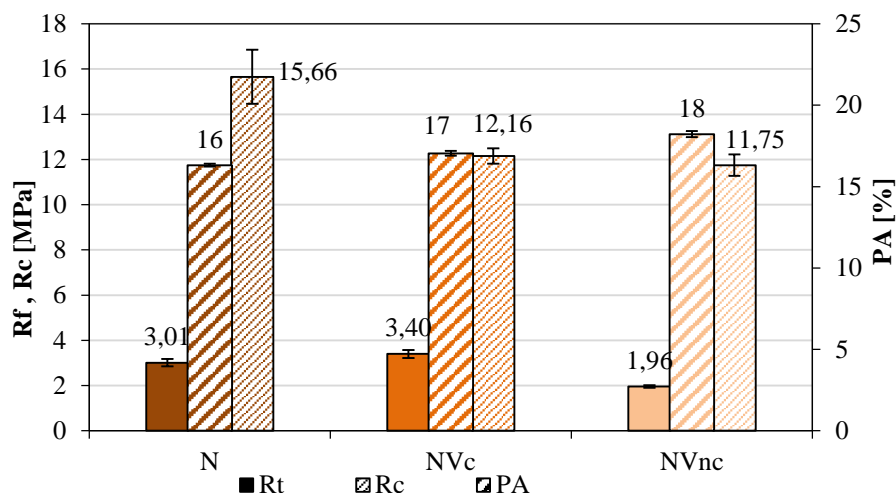


Figura 4.5 - Relação entre as resistências mecânicas e porosidade aberta das argamassas com agregado fino normalizado (N), com cinzas volantes conformes (NVc) e não conformes (NVnc)

Na figura 4.6 apresenta-se a evolução das resistências mecânicas à tração por flexão e compressão com a porosidade das argamassas com agregado fino reciclado (R) com cinzas volantes conformes (RVc) e não conformes (RVnc).

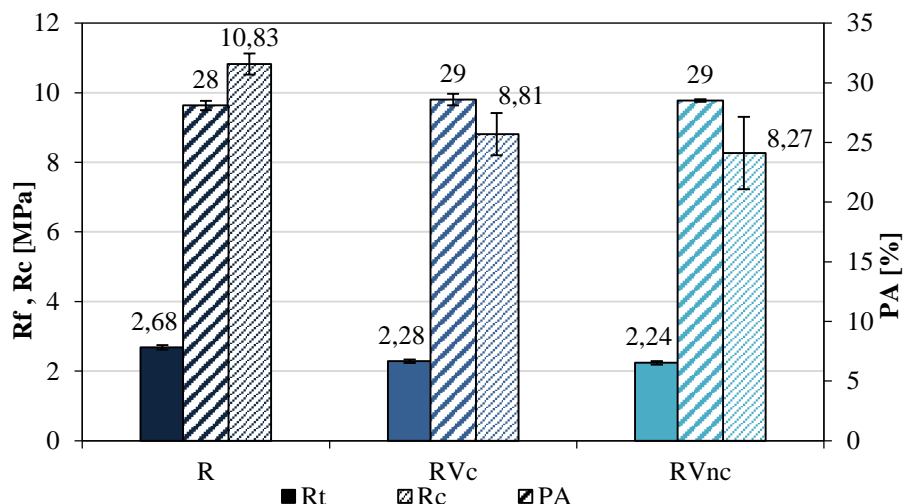


Figura 4.6 - Relação entre as resistências mecânicas e porosidade aberta das argamassas com agregado fino reciclado (R), com cinzas volantes conformes (RVc) e não conformes (RVnc)

Nas figuras 4.5 e 4.6 verifica-se que, tanto nas argamassas de agregado normalizado como nas argamassas de agregado reciclado, apesar do aumento da porosidade ser pouco significativo, existe uma tendência da diminuição das resistências mecânicas com a substituição do ligante por cinzas volantes. Este facto justifica-se porque as resistências mecânicas são função da compacidade, e esta por sua vez, complementar da porosidade: as resistências mecânicas são tanto maiores quanto menor a porosidade do material. Nas argamassas com agregado normalizado e cinzas volantes conformes, figura 4.4, a resistência à compressão diminui; contudo, o mesmo não acontece em

relação à resistência a tração (aumenta ligeiramente, encontrando-se a diferença dentro do intervalo do desvio padrão).

Os decréscimos das resistências mecânicas com a substituição do cimento por cinzas podem ser devidos à diminuição dos principais constituintes do cimento por unidade de volume de argamassa. Segundo J. Siqueira [Siqueira, 2012], a resistência à compressão diminui com o aumento da percentagem de substituição do cimento por cinzas, devido a estas argamassas apresentarem menores quantidades de hidróxido de cálcio, em relação às argamassas de referência (sem substituição do cimento por cinzas).

Esta diminuição pode ser devida às reações pozolânicas, que ocorrem pela combinação da sílica presente nas cinzas com o hidróxido de cálcio libertado pelo cimento formando os silicatos, se desenvolverem em idades mais avançadas. Estudos realizados por P. Chindaprasirt [Chindaprasirt, 2007] afirmam que aos 28 dias de cura nem todas as partículas de cinzas volantes reagiram com o hidróxido de cálcio livre. Também R. Netto [Netto, 2006] afirma que uma das desvantagens da substituição parcial do cimento por cinzas é a diminuição das resistências mecânicas iniciais em função das reações pozolânicas serem mais lentas.

#### **4.3.2. Comportamento face à ação da água**

As propriedades físicas das argamassas que caracterizam no seu comportamento face à ação da água (estudadas através dos ensaios de absorção de água por capilaridade e secagem) são em seguida analisadas e comparadas.

Como comportamento ideal, interessa que o valor total de água absorvida por capilaridade, dada pelo valor assintótico (VA), seja o menor possível e, ainda, que o coeficiente de capilaridade (CC) seja baixo, para que a velocidade a que ocorre essa absorção capilar seja reduzida. Por outro lado, as argamassas devem ter uma maior facilidade de secagem global e uma maior velocidade de secagem inicial, ou seja, menores valores de índice de secagem (IS) e elevados valores da taxa de secagem (TS). Sabendo que, tanto a secagem como a absorção de água por capilaridade dependem essencialmente das características porosas, é essencial relacionar estas propriedades com a porosidade aberta (PA) e a porometria<sup>6</sup>.

Como anteriormente referido, a quantidade máxima de água absorvida por capilaridade, traduzida pelo valor assintótico, e a taxa de secagem são respeitantes apenas aos provetes inteiros. No entanto, o índice de secagem e o coeficiente de capilaridade são analisados através da média dos provetes inteiros com os “meios” provetes.

---

<sup>6</sup> O ensaio de porosimetria de mercúrio não foi realizado por razões de logística.

Na figura 4.7 compara-se a porosidade aberta com o valor assíntótico das argamassas com agregado fino normalizado (N) e agregado fino reciclado (R). Como referido anteriormente o valor assíntótico foi obtido com provetes inteiros.

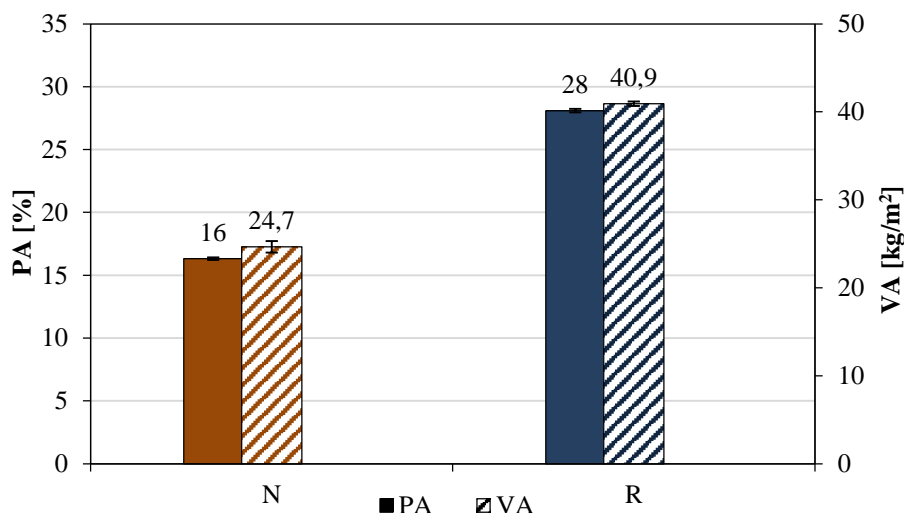


Figura 4.7 - Comparação entre a porosidade aberta e o valor assíntótico das argamassas com agregado fino normalizado (N) e agregado fino reciclado (R)

Na figura 4.8 apresenta-se a relação do valor assíntótico com a porosidade aberta das argamassas com agregado fino normalizado (N) com adição de cinzas volantes conformes (NVc) e não conformes (NVnc).

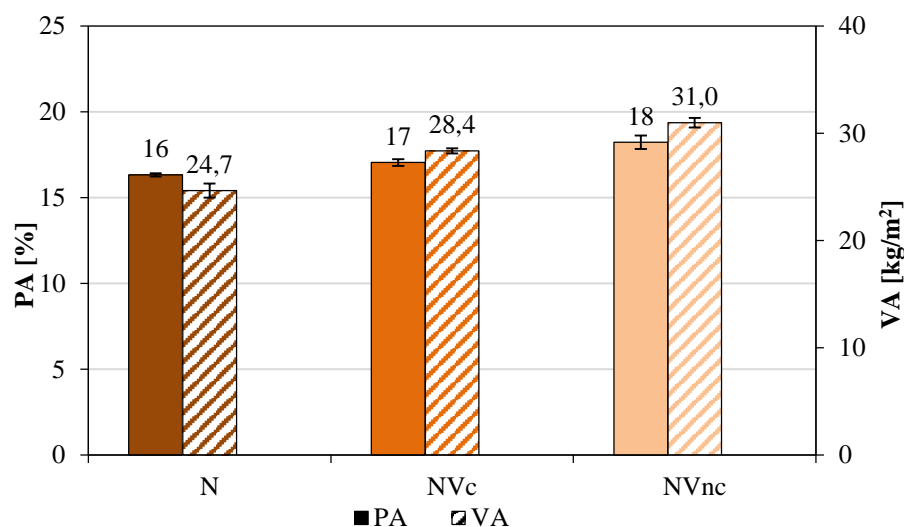


Figura 4.8 – Comparação entre a porosidade aberta e o valor assíntótico das argamassas com agregado fino normalizado (N) com adição de cinzas volantes conformes (NVc) e não conformes (NVnc)

Na figura 4.9 apresenta-se a relação entre o valor assíntótico com a porosidade das argamassas com agregado fino reciclado (R) com adição de cinzas volantes conformes (RVc) e não conformes (RVnc).

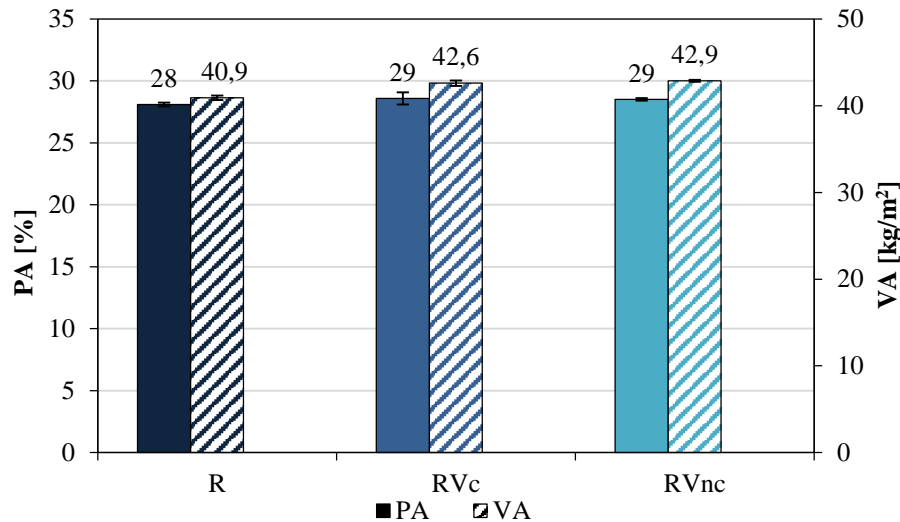


Figura 4.9 - Comparação entre a porosidade aberta e o valor assintótico das argamassas com agregado fino reciclado (R) com adição de cinzas volantes conformes (RVc) e não conformes (RVnc)

Nas figuras 4.7 a 4.9 constata-se a tendência de argamassas mais porosas acumularem maior quantidade de água absorvida (VA). Este comportamento é facilmente compreendido pelo facto de a água preencher os espaços vazios, logo quanto maior for a percentagem destes, maior será a quantidade de água que a argamassa pode absorver. Apesar de não existirem diferenças significativas, esta tendência verifica-se também para as argamassas com cinzas volantes.

Uma vez que os espaços vazios das argamassas são preenchidos por água, é possível estima, através da porosidade aberta, a quantidade de água que uma argamassa pode conter, calculado pela expressão 4.1.

$$VA_{est} = \frac{PA \times V}{A} \times 10^3 \text{ [kg/m}^2\text{]} \quad (4.1)$$

sendo:

A – Área de absorção (base do provete:  $0,04 \times 0,04 = 0,016 \text{ m}^2$ );

V – Volume do provete ( $0,04 \times 0,04 \times 0,16 = 0,000256 \text{ m}^3$ );

PA – Porosidade aberta [%].

Na tabela 4.1 e na figura 4.10 apresentam-se os valores do valor assintótico obtido experimentalmente e o calculado através da porosidade.

Tabela 4.1 – Valor assintótico

Argamassas	PA [%]	VA medido [kg/m <sup>2</sup> ]	VA estimado [kg/m <sup>2</sup> ]
N	16,32	24,66	26,11
R	28,10	40,92	44,95
NVc	17,04	28,35	27,27*
NVnc	18,22	30,98	29,16*
RVc	28,59	42,61	45,74
RVnc	28,51	42,88	45,62
NRVc	23,79	32,54	38,06
NRVnc	21,73	37,48	35,99*
R'r	27,71	43,96	44,34
R'	28,34	43,60	45,35

(\*) - não verificam o esperado (VA medido < VA teórico)

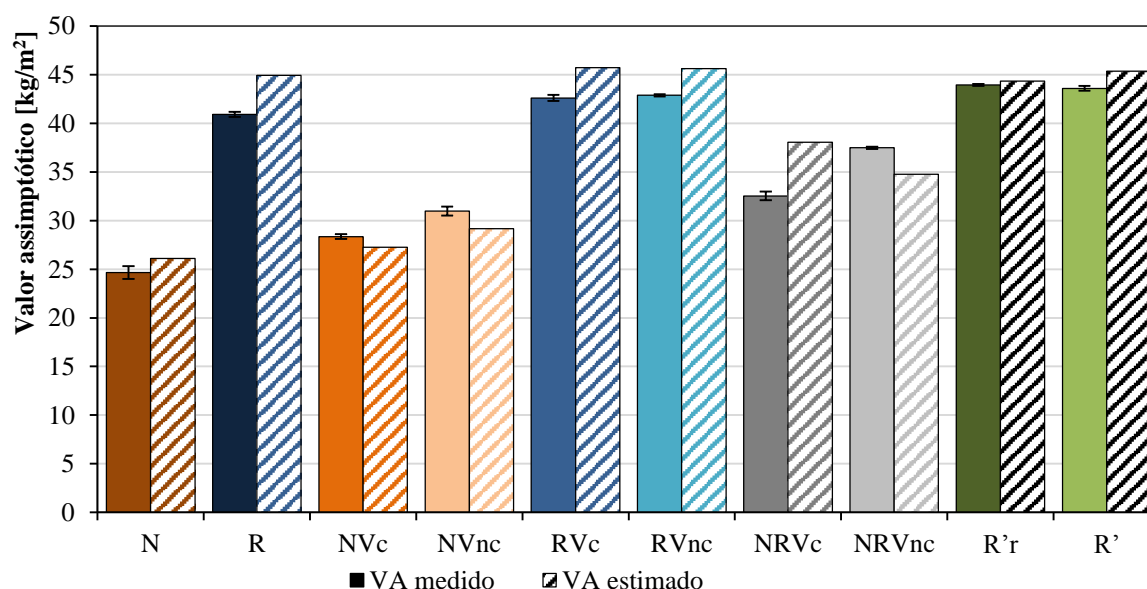


Figura 4.10 – Resultados do valor assintótico estimado e medido experimentalmente

Na tabela 4.1 e na figura 4.10 constata-se que a maioria das argamassas apresenta um valor de VA medido experimentalmente inferior ao calculado teoricamente.

Os valores que não verificam o esperado (VA medido < VA teórico), continuam indicados na tabela porque se julga que as diferenças (reduzidas) podem ser explicadas pela heterogeneidade das argamassas, eventuais diferenças de compactação entre outros fatores.



Sendo que a taxa de secagem e o coeficiente de capilaridade traduzem “velocidades iniciais”, de secagem e de absorção de água, respetivamente, é necessário analisar estes parâmetros, figura 4.11.

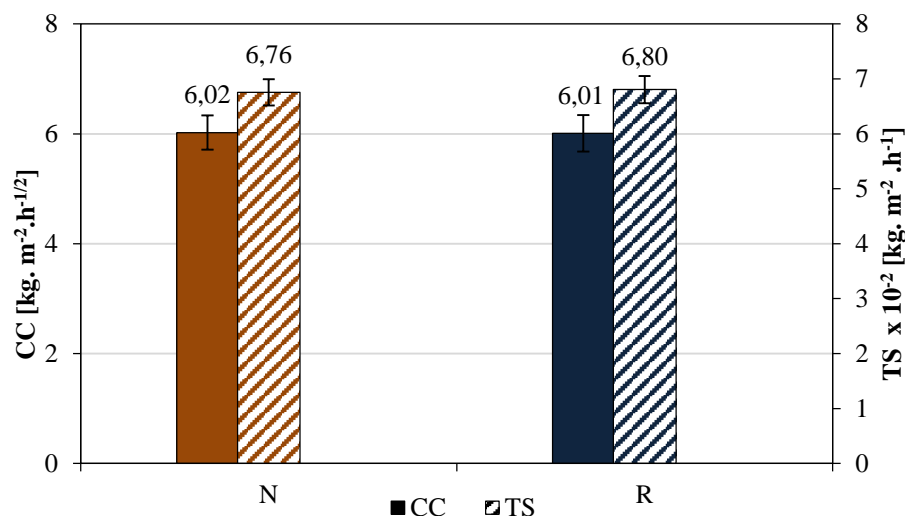


Figura 4.11 - Comparação entre a taxa de secagem e o coeficiente de capilaridade das argamassas com agregado fino normalizado (N) e agregado fino reciclado (R)

Na figura 4.11 observa-se que, para ambas as argamassas, o coeficiente de capilaridade e a taxa de secagem apresentam uma variação ínfima, mantendo-se os valores relativamente constantes (a diferença encontra-se no intervalo de variação do desvio-padrão).

Na figura 4.12 apresenta-se a relação entre a taxa de secagem e o coeficiente de capilaridade das argamassas com agregado fino normalizado (N) com adição de cinzas volantes conformes (NVc) e não conformes (NVnc).

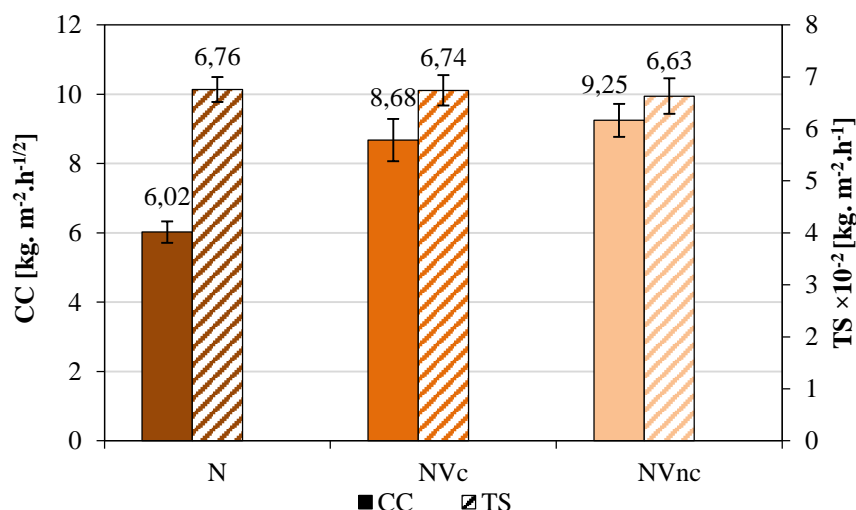


Figura 4.12 - Comparação entre a taxa de secagem e o coeficiente de capilaridade das argamassas com agregado fino normalizado (N) com adição de cinzas volantes conformes (NVc) e não conformes (NVnc)

Na figura 4.12 constata-se que, com a substituição de cimento por cinzas, o coeficiente de capilaridade aumenta em relação à argamassa sem cinzas.

A capilaridade traduz a capacidade do material absorver água através de forças de sucção, sendo que a progressão da água é tanto mais rápida e significativa quanto mais pequenos forem os poros/capilares do material. Poros pequenos apresentam pressões capilares mais elevadas (a pressão varia inversamente ao raio dos poros) [Faria, 2004]. Por este motivo, deduz-se que as argamassas com cinzas volantes são constituídas por poros de menores dimensões, pois a absorção ocorre mais rapidamente.

Quanto à taxa de secagem constata-se, que este parâmetro se mantém constante nas argamassas com a presença de cinzas.

Para compreender e justificar este comportamento seria necessária informação sobre o tamanho e forma dos poros no interior das argamassas, obtidos pelo ensaio de porosimetria de mercúrio<sup>7</sup>.

Segundo estudo realizado por P. Chindaprasirt [Chindaprasirt, 2007] as argamassas com substituição parcial do cimento por cinzas volantes também apresentam poros com menores dimensões do que argamassas sem cinzas. O autor justifica este facto através da finura, afirmando que quanto mais finas forem as cinzas, menores são os poros das argamassas.

Na figura 4.13 apresenta-se a relação entre a taxa de secagem e o coeficiente de capilaridade das argamassas com agregado fino reciclado (R) com cinzas volantes conformes (RVc) e não conformes (RVnc).

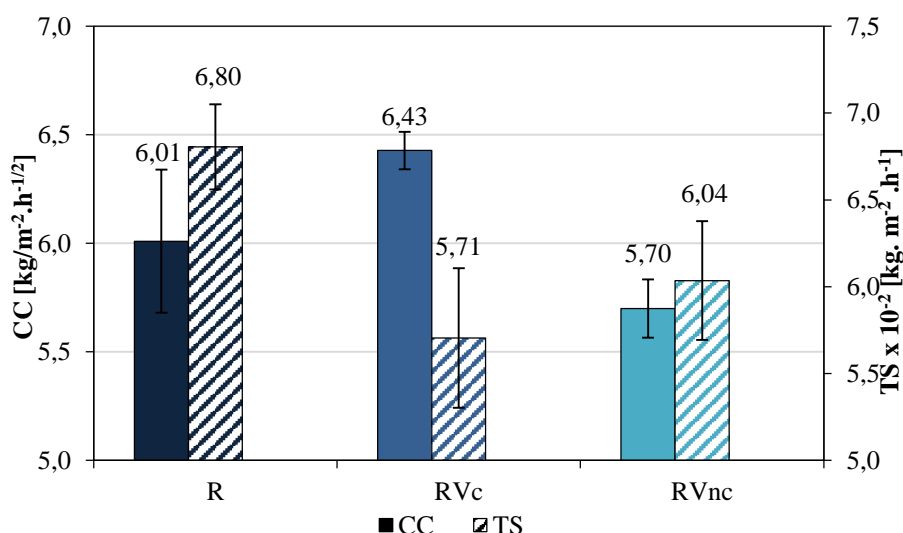


Figura 4.13 - Comparação entre a taxa de secagem e o coeficiente de capilaridade das argamassas com agregado fino reciclado (R) com adição de cinzas volantes conformes (RVc) e não conformes (RVnc)

<sup>7</sup> Ver nota de rodapé 6

Na figura 4.13 observa-se que a taxa de secagem nas argamassas com cinzas volantes apresenta uma ligeira diminuição, comparativamente à argamassa de referência sem cinzas, traduzindo uma velocidade de secagem inicial mais lenta.

Com base no referido na figura 4.12, será assim expectável que as argamassas com cinzas volantes e agregados reciclados absorvam água mais rapidamente. No entanto, a combinação de agregados reciclados e cinzas volantes conduz a um aumento do coeficiente de capilaridade nas argamassas de cinzas volantes conformes, e uma diminuição nas argamassas com cinzas volantes não conformes, não apresentando assim, uma tendência clara. Relativamente à taxa de secagem, este parâmetro apresenta uma ligeira diminuição nestas argamassas.

Na figura 4.14 compara-se a porosidade aberta e o índice de secagem das argamassas com agregado fino normalizado (N) e agregado fino reciclado (R).

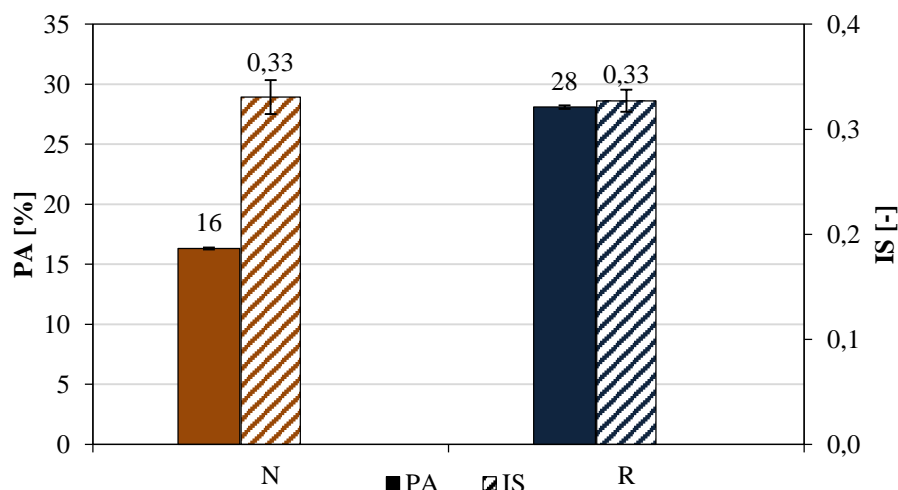


Figura 4.14 - Comparação entre o índice de secagem e a porosidade aberta das argamassas com agregado fino normalizado (N) e agregado fino reciclado (R)

Na figura 4.14 constata-se que as argamassas constituídas por agregado fino reciclado apresentam valores superiores de porosidade, o que implica uma maior quantidade de água absorvida por capilaridade (ver figura 4.7). Relativamente ao índice de secagem, este parâmetro apresenta um valor constante para ambas as argamassas. Como as argamassas de agregado fino reciclado apresentam o mesmo valor de secagem global para uma quantidade de água absorvida superior, pode deduzir-se que estas argamassas apresentam poros de maiores dimensões (secam mais rápido mas contém mais água para evaporar), comparativamente às argamassas de agregado fino normalizado.

Na figura 4.15 apresenta-se a relação entre o índice de secagem e a porosidade aberta das argamassas com agregado fino normalizado (N), com cinzas volantes conformes (NVc) e não conformes (NVnc).

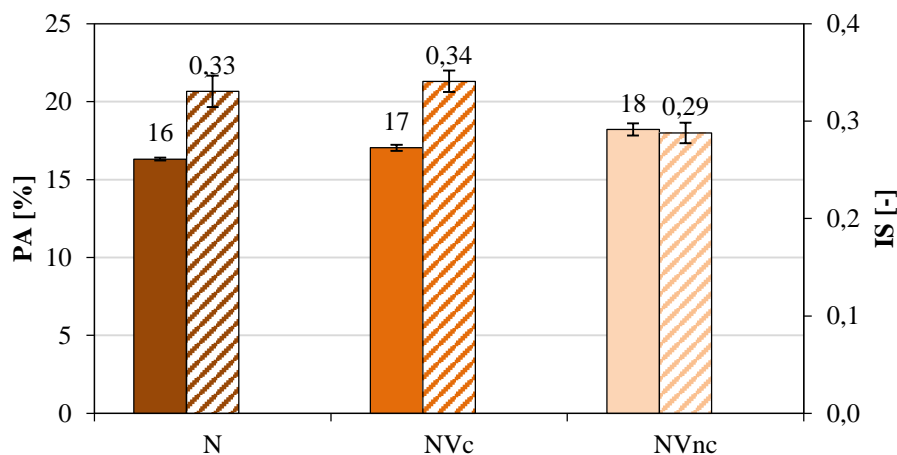


Figura 4.15 - Comparação entre a taxa de secagem e o coeficiente de capilaridade das argamassas com agregado fino normalizado (N) com adição de cinzas volantes conformes (NVc) e não conformes (NVnc)

Na figura 4.16 apresenta-se a relação entre a taxa de secagem e o coeficiente de capilaridade das argamassas com agregado fino reciclado (R) com cinzas volantes conformes (RVc) e não conformes (RVnc).

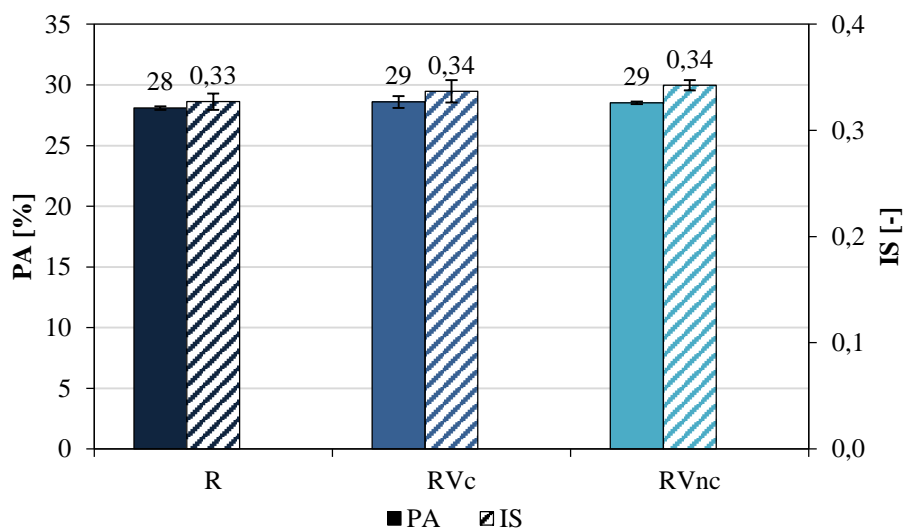


Figura 4.16 - Comparação entre a taxa de secagem e o coeficiente de capilaridade das argamassas com agregado fino reciclado (R) com adição de cinzas volantes conformes (RVc) e não conformes (RVnc)

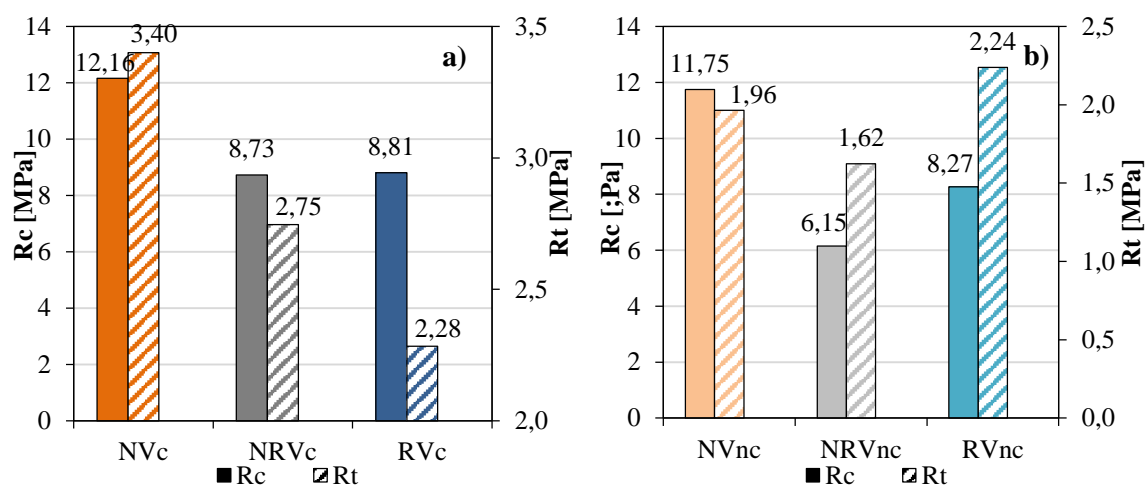
Nas figuras 4.15 e 4.16 observa-se que para ambas as argamassas, o índice de secagem e a porosidade apresentam variações pouco significativas, mantendo-se os valores relativamente constantes para todas as argamassas (a diferença dos valores encontra-se no intervalo da variação do desvio-padrão).

Além disso, verifica-se que tanto a taxa de secagem como o índice de secagem apresentam pequenas variações entre as argamassas ensaiadas (ver figuras 3.35 e 3.36). Este “fenómeno” pode estar relacionado, entre outros aspetos, com o procedimento de ensaio realizado, no qual as faces laterais dos provetes não foram impermeabilizadas.

### 4.3.3. Influência da mistura dos agregados

De forma a avaliar a influência da mistura dos dois tipos de agregados, procede-se à comparação entre argamassas constituídas com cada um dos agregados e argamassas com ambos os agregados. Para tal agruparam-se as argamassas constituídas com cinzas volantes conformes, diferenciando no agregado utilizado. De igual forma procede-se à análise das argamassas com cinzas não conformes com os diferentes agregados.

Na figura 4.17 apresenta-se a relação das resistências mecânicas e módulo de elasticidade das argamassas com mistura dos agregados e cinzas volantes com as argamassas de agregado normalizado e cinzas volantes e as argamassas com agregado reciclado e cinzas volantes.



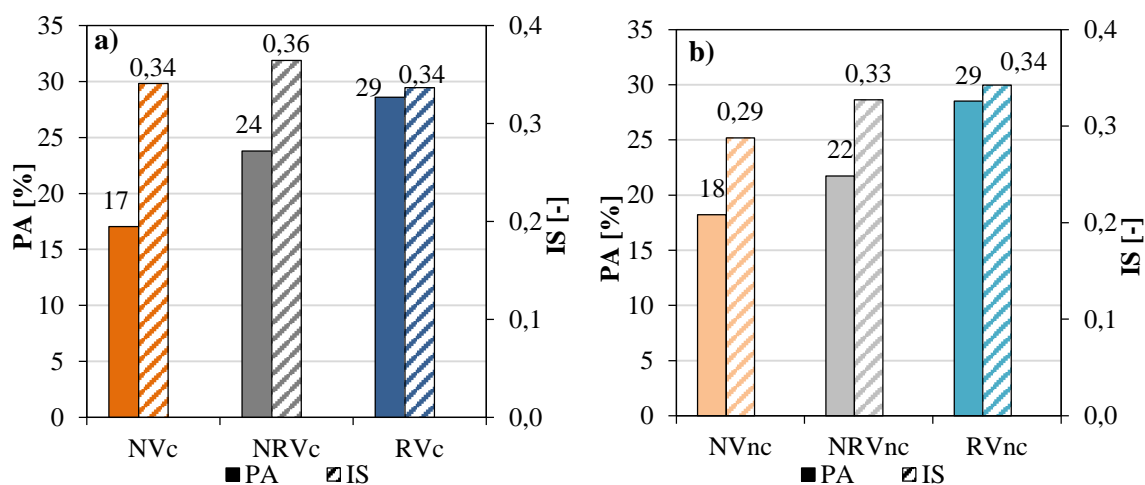
a) Argamassas com cinzas conformes; b) Argamassas com cinzas não conformes

Figura 4.17 - Relação entre resistências mecânicas e módulo de elasticidade das argamassas com cinzas volantes

Na figura 4.17 a) verifica-se que as argamassa com a mistura dos agregados apresentam resistências mecânicas que as argamassas com agregado normalizado e cinzas conformes mas superiores às argamassas com agregado reciclado e cinzas conformes. Constatase assim um decréscimo das características mecânicas quando se adicionam agregados reciclados, o que está de acordo com os resultados de outros autores de trabalhos experimentais com agregados reciclados, nomeadamente F. Lima [Lima, 2005] e G. Moriconi [Moriconi, 2009].

No entanto, na figura 4.17 b), nas argamassas com cinzas não conformes e mistura dos agregados, as resistências mecânicas são menores do que nas argamassas com cada um dos agregados individualizados.

Na figura 4.18 apresenta-se a relação entre a porosidade e o índice de secagem das argamassas com mistura dos agregados normalizados e reciclados e cinzas volantes conformes e não conformes.



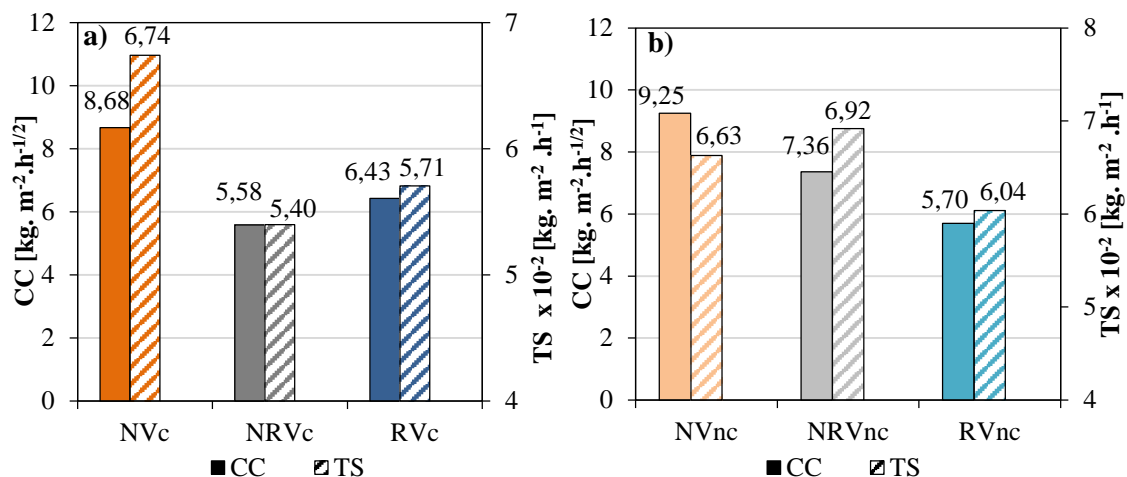
a) Argamassas com cinzas volantes conformes; b) Argamassas com cinzas volantes não conformes

Figura 4.18 – Relação entre porosidade aberta e índice de secagem das diferentes argamassas

Através da figura 4.18 constata-se que as argamassas com a mistura dos agregados apresentam valores intermédios de porosidade aberta relativamente às argamassas homólogas constituídas com cada um dos agregados em separado. Assim, reforça-se a observação referida anteriormente a propósito da figura 4.4: a presença de agregado reciclado conduz a um aumento da porosidade. Relativamente ao índice de secagem verifica-se na figura 4.18 a) que a argamassas com mistura dos agregados e cinzas volantes conformes apresenta um valor ligeiramente superior face às argamassas com cada um dos agregados. Sendo esta diferença pouco significativa (dentro do intervalo de variação do desvio-padrão), considera-se que o índice de secagem é relativamente constante em todas as argamassas com cinzas volantes conformes.

Nas argamassas com cinzas volantes não conformes, figura 4.18 b), verifica-se que a argamassa constituída com a mistura dos agregados apresenta um valor intermédio de índice de secagem face às argamassas com apenas um dos agregados.

Na figura 4.19 mostra-se a relação entre a taxa de secagem e o coeficiente de capilaridade das argamassas com mistura de agregados normalizados e reciclados e cinzas volantes conformes e não conformes.

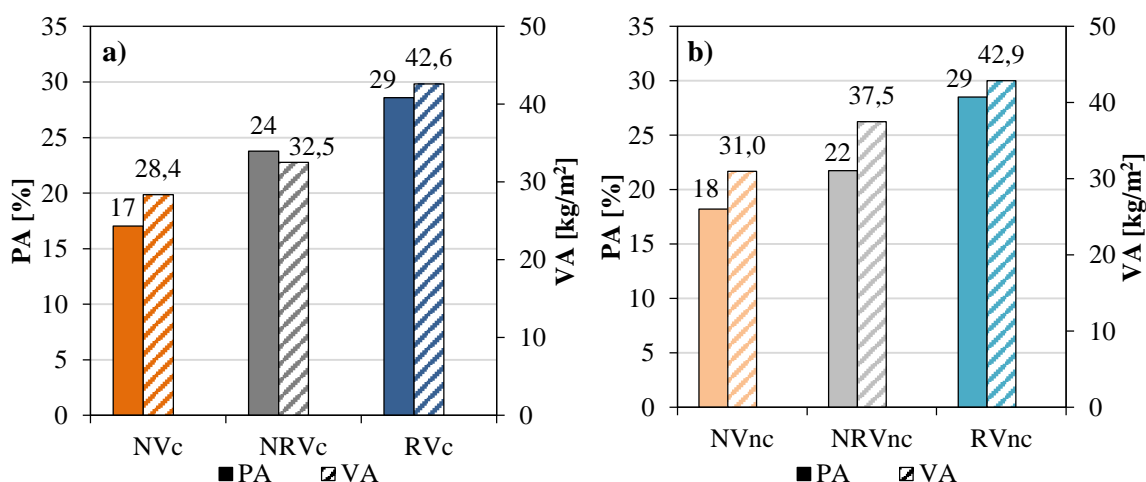


a) Argamassas com cinzas volantes conformes; b) Argamassas com cinzas volantes não conformes  
 Figura 4.19 - Relação entre o coeficiente de capilaridade e a taxa de secagem das diferentes argamassas

Através da figura 4.19 a) verifica-se que as argamassas com ambos os agregados e cinzas volantes conformes ostentam o menor valor de coeficiente de capilaridade, relativamente às argamassas constituídas por cada um dos agregados em separado. Quanto à taxa de secagem, nas argamassas com cinzas conformes, este parâmetro apresenta um valor intermédio face às argamassas com os agregados individualizados.

Nas argamassas com cinzas volantes não conformes e mistura de agregados, figura 4.19 b), o coeficiente de capilaridade apresenta um valor intermédio face às argamassas com os agregados individualizados. A taxa de secagem aumenta nas argamassas com a mistura dos agregados, em relação às constituídas apenas por cada um dos agregados em separado (apesar do aumento ser relativamente ligeiro face às argamassas com agregado normalizado).

Na figura 4.20 indica-se a relação entre a porosidade e o valor assintótico das argamassas com mistura de agregados normalizados e reciclados e cinzas volantes conformes e não conformes.



a) Argamassas com cinzas volantes conformes; b) Argamassas com cinzas volantes não conformes  
 Figura 4.20 - Relação entre a porosidade e o valor assintótico das diferentes argamassas

Na figura 4.20 verifica-se que tanto nas argamassas com cinzas conformes como nas argamassas com cinzas não conformes, a argamassa com mistura dos dois agregados apresenta valores de porosidade e de valor assintótico superior às argamassas com agregado normalizado e inferior às de agregado reciclado. Significa assim, que a mistura dos agregados conduz a valores intermédios de porosidade e valor assintótico face às argamassas com os agregados em separado. Este facto deve-se ao aumento da porosidade, que aumenta com a percentagem de agregados reciclados, e consequentemente um aumento da quantidade de água absorvida (ver figura 4.7).

#### **4.3.4. Influência do retardador de presa**

O retardador de presa é um adjuvante solúvel em água que atua quimicamente, através da ação de ácidos hidrocarboxílicos que reduzem a velocidade de dissolução dos compostos de hidratação do ligante de uma argamassa, retardando a hidratação e, consequentemente a presa. O aumento da viscosidade da massa é mais lento e o tempo de trabalhabilidade da massa fresca é maior. Ou seja, por outras palavras, permitem aumentar o tempo de presa, sem aumentar a quantidade de água. O efeito destes retardadores de presa depende de vários fatores, tais como o tipo de cimento, a relação a/l e a temperatura ambiente [Sousa-Coutinho, 1988]. A presa é tanto mais rápida quanto menor for a quantidade de água, no sentido de a aproximar da quantidade estritamente necessária para a hidratação dos componentes [Coutinho, 2002].

Relativamente aos resultados dos ensaios, na maioria das características ensaiadas estas argamassas apresentam valores dentro da mesma ordem de grandeza relativamente à argamassa de agregado reciclado de 1ª fase sem adições (R), nomeadamente, valor assintótico e coeficiente de capilaridade (figuras 3.31 e 3.32), índice e taxa de secagem (figuras 3.36 e 3.37) e massa volúmica aparente e real (figuras 3.39 e 3.40).

Na figura 4.21 indicam-se os valores das resistências à compressão e tração por flexão para a argamassas de referência (R), e para as argamassas de 2ª fase, constituídas por agregado remanescente e retardador de presa (R'r) e sem retardador de presa (R').



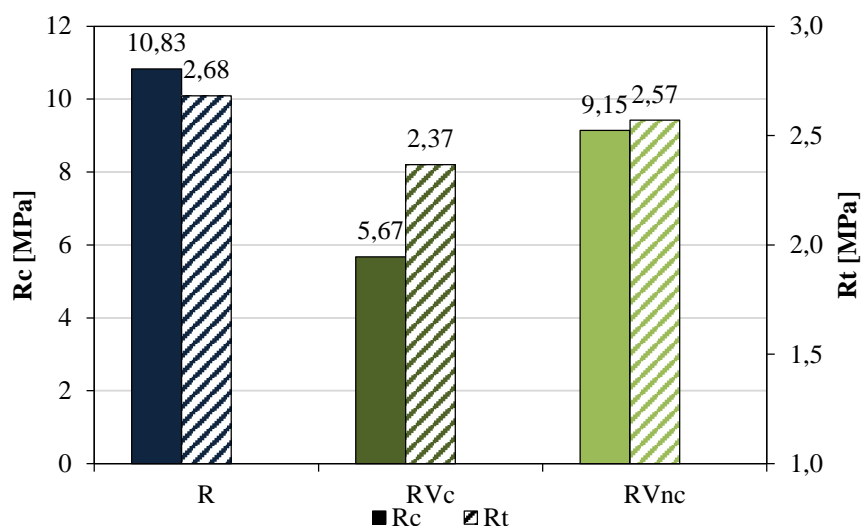


Figura 4.21 – Comparação entre resistências mecânicas da argamassa de referência com as argamassas de 2ª fase - material sobranante (agregado remanescente)

Na figura 4.21 verifica-se que a introdução do retardador de presa provocou uma diminuição da resistência à compressão e um aumento significativo do módulo de elasticidade dinâmico. O aumento do módulo de elasticidade pode estar relacionado com a contribuição do adjuvante para diminuição da heterogeneidade do material.

Quanto à resistência à compressão esta diminuição não é acompanhada por um aumento de porosidade (a qual se mantém constante para estas argamassas). Assim sendo, com base nas restantes propriedades que se mantêm, os resultados relativamente à resistência à compressão destas argamassas são inconclusivos, aliado ao facto de que a introdução de um aditivo não deverá ter influência nas propriedades das argamassas, e quanto muito deve melhorá-las.

Como esperado, durante a moldagem das argamassas verificou-se uma grande melhoria no tempo de trabalhabilidade da mistura com a introdução do retardador de presa nas argamassas com agregados reciclados, tornando assim possível a sua aplicação.



## **Capítulo 5**

# **ANÁLISE COMPARATIVA DE RESULTADOS**

### **5.1. Considerações iniciais**

Neste capítulo são recuperados os resultados dos trabalhos de investigação de outros autores sobre argamassas de cimento (com traços volumétricos), apresentados na secção 2.4, com vista à sua comparação com os obtidos na presente dissertação. Esta análise é realizada tendo em consideração algumas diferenças nas características estudadas, na campanha experimental e na constituição das argamassas, nomeadamente: desconhecimento do teor de inqueimados das cinzas volantes, diferentes composições e granulometrias dos constituintes das argamassas, equipamentos, nível de compactação, percentagens de substituições e traços volumétricos.

Em seguida, é realizada uma análise qualitativa das tendências de aumento/diminuição das características das argamassas dos trabalhos inseridos na linha de investigação, apresentada na secção 2.5.

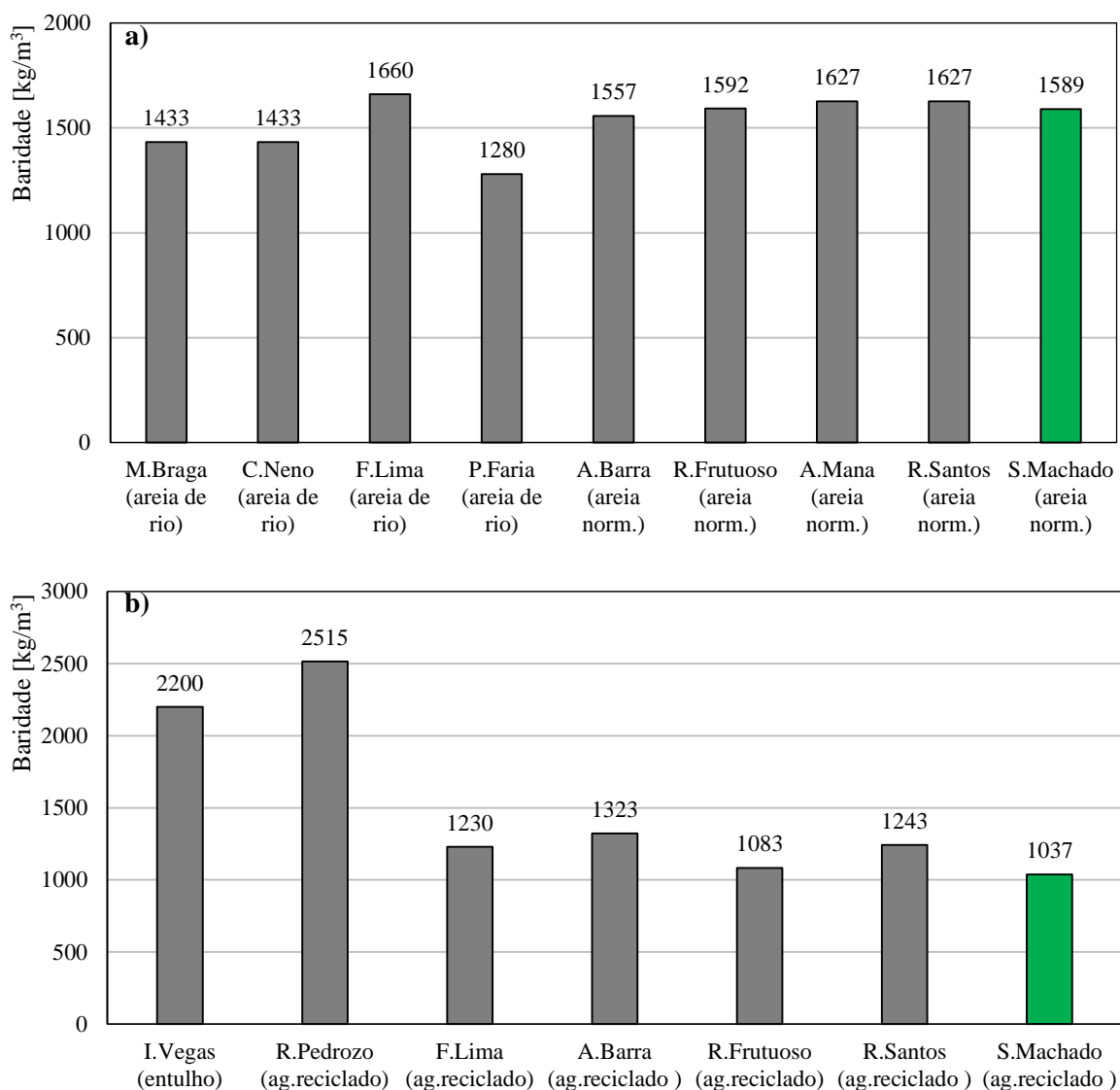
### **5.2. Comparação das características das argamassas ensaiadas com outros autores pesquisados**

#### **5.2.1. Caracterização das matérias-primas**

Para a caracterização física dos constituintes das argamassas estudadas, analisam-se os resultados obtidos no ensaio de determinação da baridade dos agregados, dos ligantes e das cinzas volantes.

### **Baridade dos constituintes das argamassas**

Na figura 5.1 são comparados os resultados obtidos no ensaio de baridade dos agregados normalizados e reciclados.



a) Agregados normalizados e naturais; b) Agregados reciclados

Figura 5.1 – Resultados do ensaio de baridade dos diferentes agregados

Na figura 5.1 verifica-se que, relativamente aos agregados normalizados, os valores obtidos no ensaio de baridade encontram-se dentro da mesma ordem de grandeza dos resultados obtidos por outros autores. No entanto, nos agregados reciclados as diferenças nos valores de baridade evidenciam a heterogeneidade destes materiais, sendo que os últimos quatro trabalhos se encontram inseridos na linha de investigação, os materiais foram recolhidos na mesma empresa de tratamento de resíduos (SGR).

Na figura 5.2 são comparados os resultados obtidos no ensaio de baridade do cimento utilizado pelos diferentes autores.

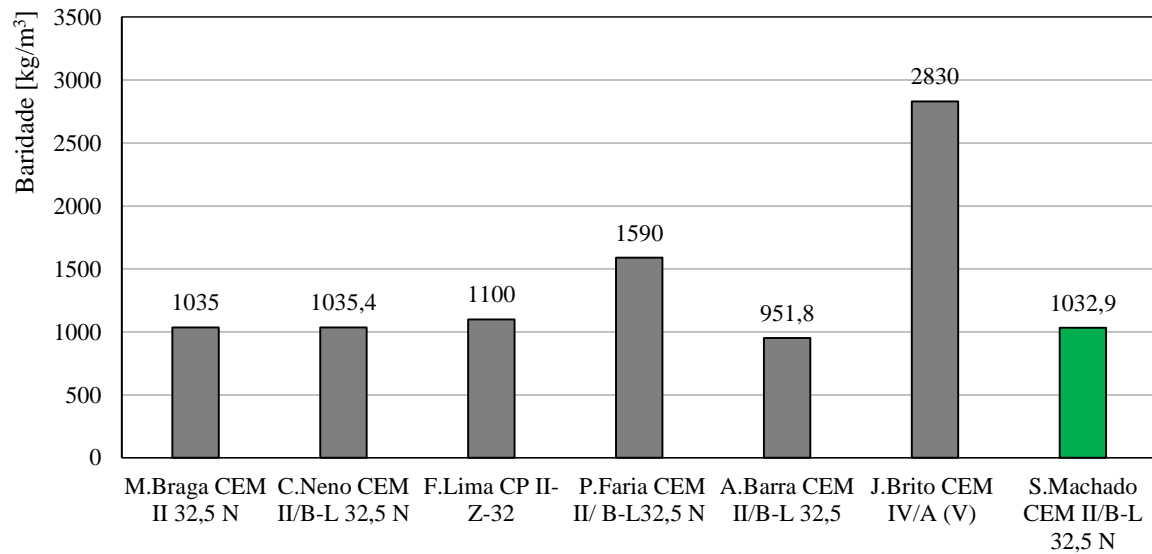
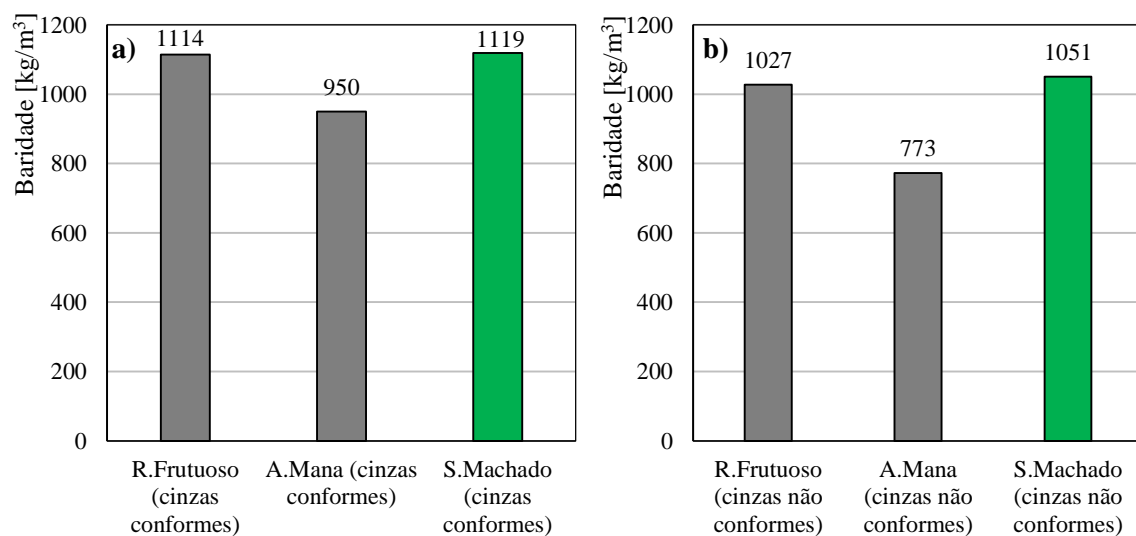


Figura 5.2 – Baridade do cimento

Na figura 5.2 verifica-se, como esperado, que o valor da baridade do cimento obtido na presente dissertação encontra-se dentro da mesma ordem de grandeza dos resultados obtidos pelos restantes autores. No trabalho realizado por J. Brito [Brito, 2013] foi utilizado um cimento do tipo IV, o que o difere de todos os outros autores, e P. Faria [Faria, 2004] procedeu a alguma compactação.

Na figura 5.3 são comparados os resultados obtidos no ensaio de baridade das cinzas volantes conformes e não conformes.



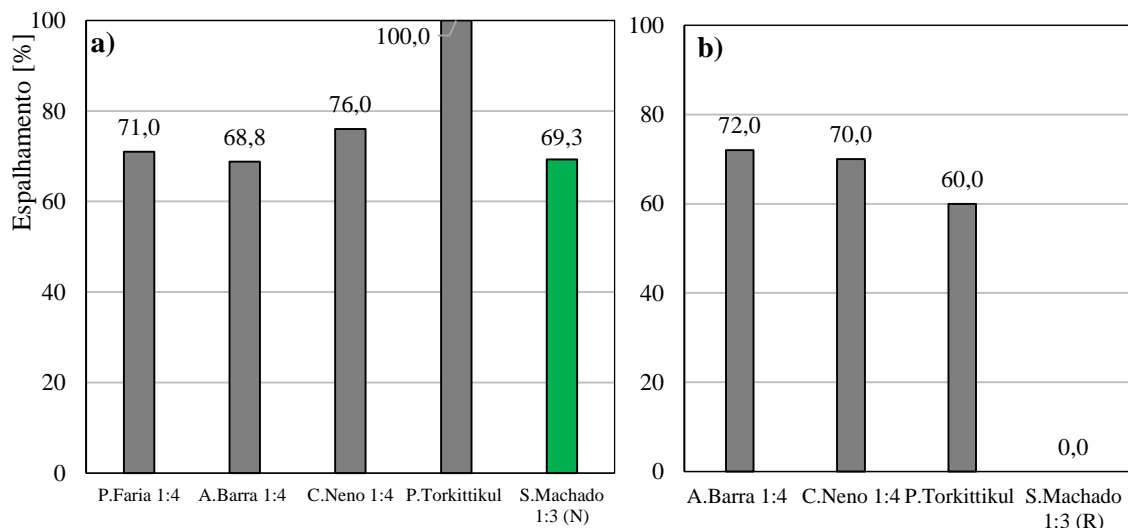
a) Baridade das cinzas volantes conformes; b) Baridade das cinzas volantes não conformes

Figura 5.3 – Baridade das cinzas volantes

### 5.2.2. Caracterização das argamassas no estado fresco

#### *Consistência por espalhamento*

Na figura 5.4 são comparados os resultados obtidos no ensaio de consistência por espalhamento das argamassas ensaiadas.



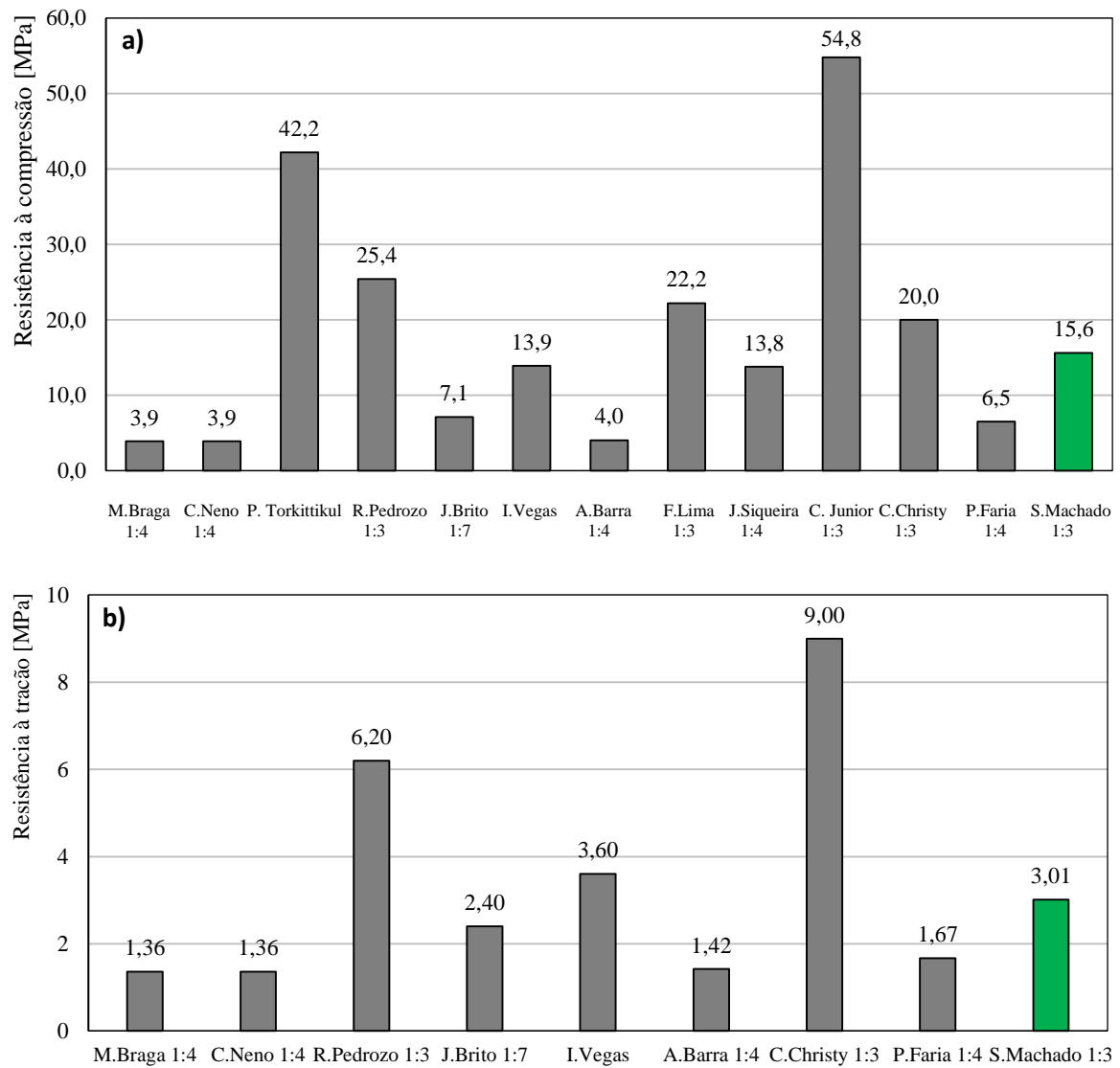
a) Argamassas com agregados normalizados e naturais; b) Argamassas com agregados reciclados  
 Figura 5.4 – Resultados obtidos no ensaio de consistência por espalhamento

Na figura 5.4 verifica-se que as argamassas constituídas com agregados reciclados obtiveram valores de espalhamento inferiores comparativamente às argamassas com agregados normalizados. Na presente dissertação este ensaio foi nulo. Este facto deve-se à heterogeneidade dos agregados e à presença de partículas angulosas, que diminuem a consistência da mistura.

### 5.2.3. Caracterização das argamassas endurecidas

#### *Resistências mecânicas*

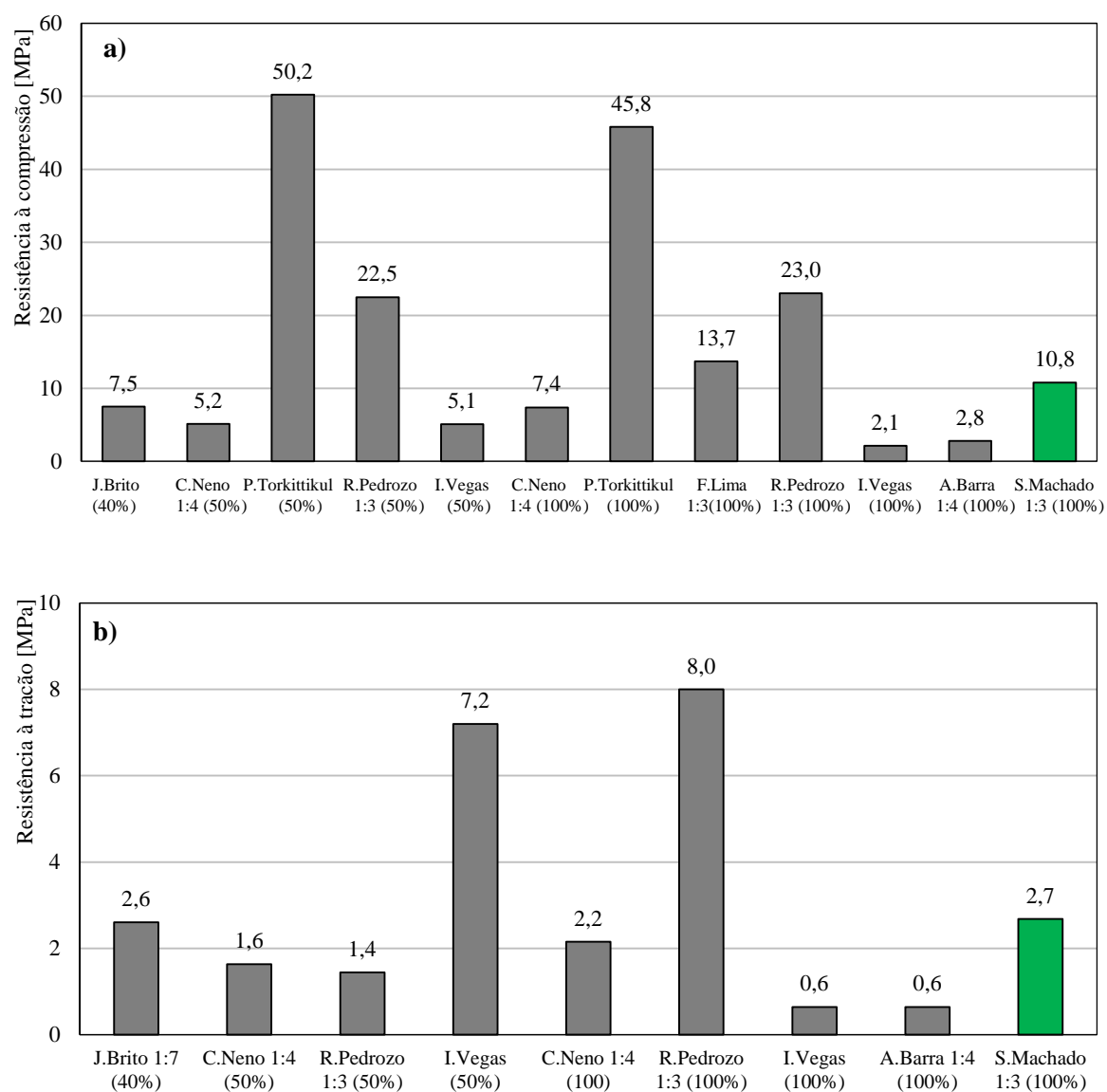
Na figura 5.5 são comparados os resultados das resistências mecânicas à compressão e à tração por flexão, da argamassa de referência com agregados finos normalizados e das argamassas semelhantes ensaiadas por outros autores.



a) Resultados da resistência à compressão; b) Resultados da resistência à tração

Figura 5.5 - Resultados dos ensaios de resistências mecânicas das argamassas de cimento com agregados normalizados e naturais, com traços volumétricos

Na figura 5.6 são comparados os resultados das resistências mecânicas à compressão e à tração por flexão, das argamassas constituídas por agregados reciclados e argamassas semelhantes ensaiadas por outros autores (desde substituições de 40% em massa de agregados normalizados ou naturais por agregados reciclados até argamassas constituídas por 100% em massa por agregados reciclados).

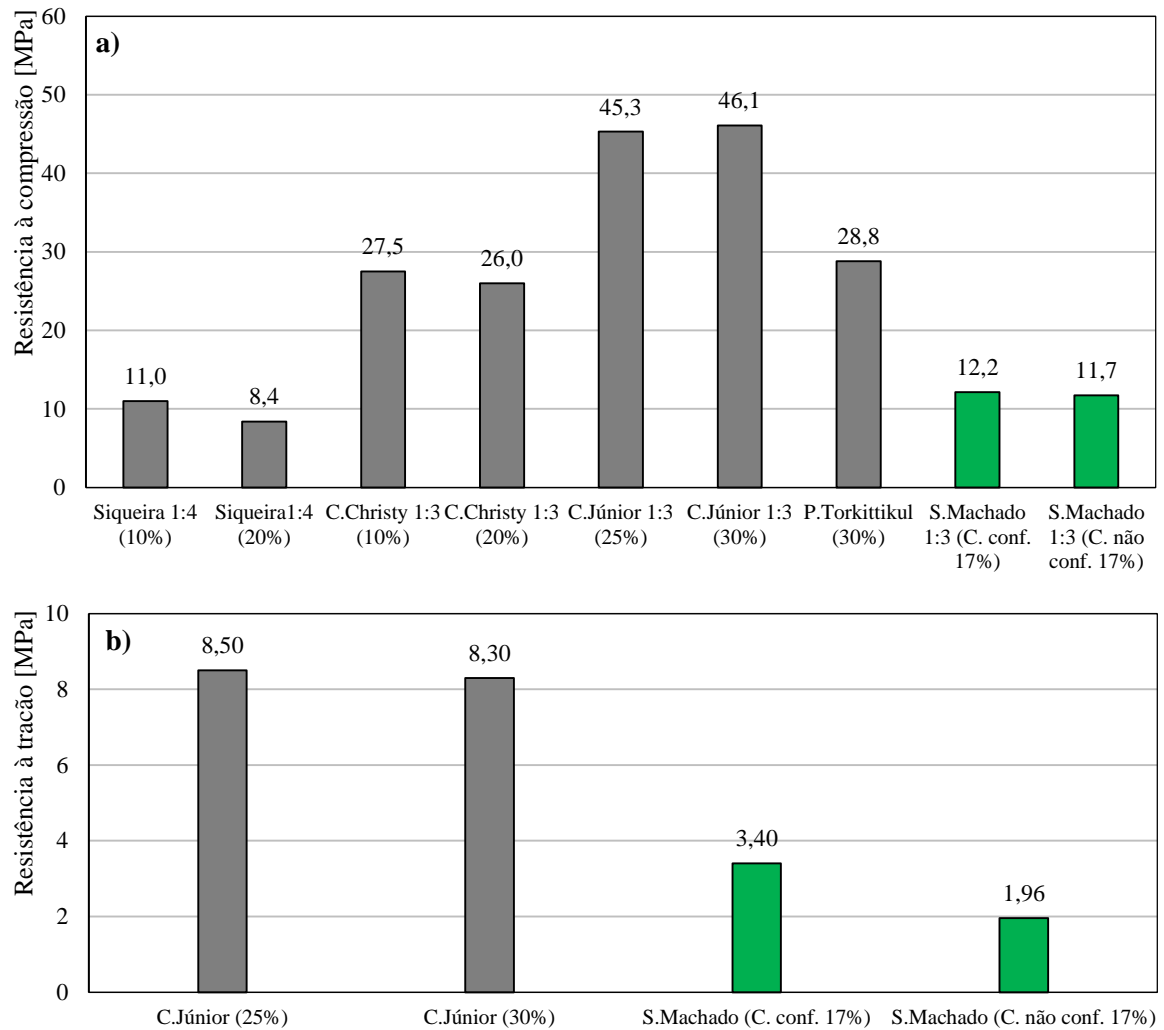


a) Resultados da resistência à compressão; b) Resultados da resistência à tração

Figura 5.6 - Resultados dos ensaios de resistências mecânicas das argamassas de cimento com agregados reciclados, com traços volumétricos

Na figura 5.7 são comparados os resultados das resistências mecânicas à compressão e à tração por flexão, respetivamente, das argamassas com agregados normalizados ou naturais com substituições parciais em massa (indicadas em percentagens) de cimento por cinzas volantes.





a) Resultados da resistência à compressão; b) Resultados da resistência à tração

Figura 5.7 - Resultados dos ensaios de resistências mecânicas das argamassas de agregado normalizado e cinzas volantes

Da análise das figuras 5.5 a 5.7 verifica-se que alguns valores de resistências mecânicas obtidos por outros autores apresentam-se superiores aos obtidos na presente dissertação. Estes podem ser justificados pelos diferentes tipos de cimento e traços volumétricos utilizados nas argamassas produzidas: C. Júnior [Junior, 2011] e P. Torkittikul [Torkittikul, 2010] usam cimento Portland do tipo I que contém maior quantidade de clínquer e por essa razão apresenta resistências mecânicas superiores ao cimento do tipo II utilizado pelos restantes autores.

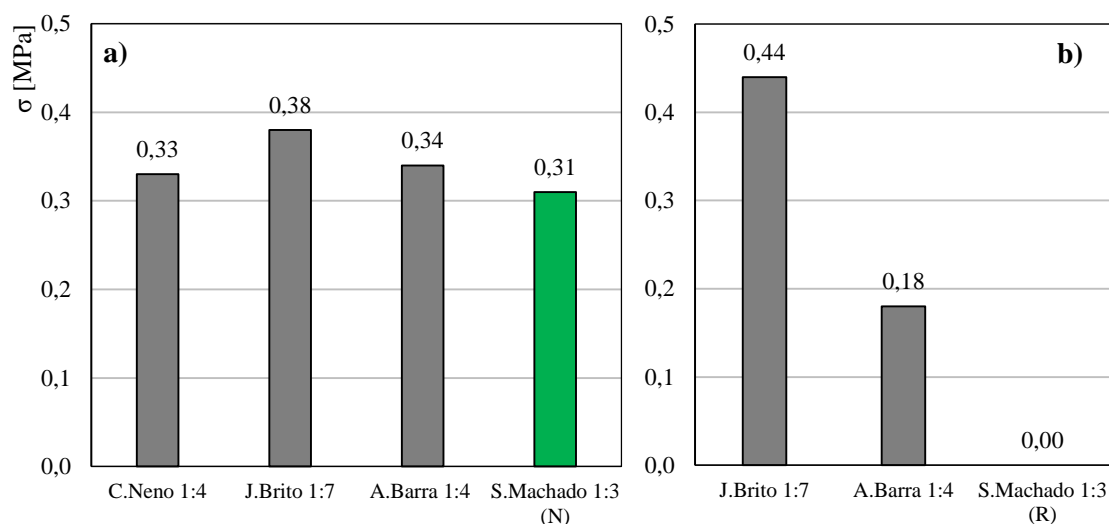
Apesar de não se verificar a mesma tendência em todos os resultados de outros autores, no trabalho desenvolvido por A.Barra [Barra, 2013]<sup>8</sup> verifica-se a tendência de diminuição das resistências

<sup>8</sup> O trabalho realizado por A.Barra [Barra, 2013], incluído na mesma linha de investigação que a presente dissertação, foi realizado com uma constituição das argamassas semelhante às argamassas estudadas neste trabalho experimental. No entanto, a recolha do agregado foi realizada na mesma empresa mas em alturas distintas (conduzindo a composições díspares do material) e o traço escolhido ser diferente, impossibilita uma comparação direta com a presente dissertação.

mecânicas nos agregados reciclados, que é comportamento semelhante ao apresentado nas argamassas estudadas na presente dissertação.

### ***Aderência ao suporte***

Na figura 5.8 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de aderência ao suporte das argamassas de referência e das argamassas ensaiadas por outros autores.

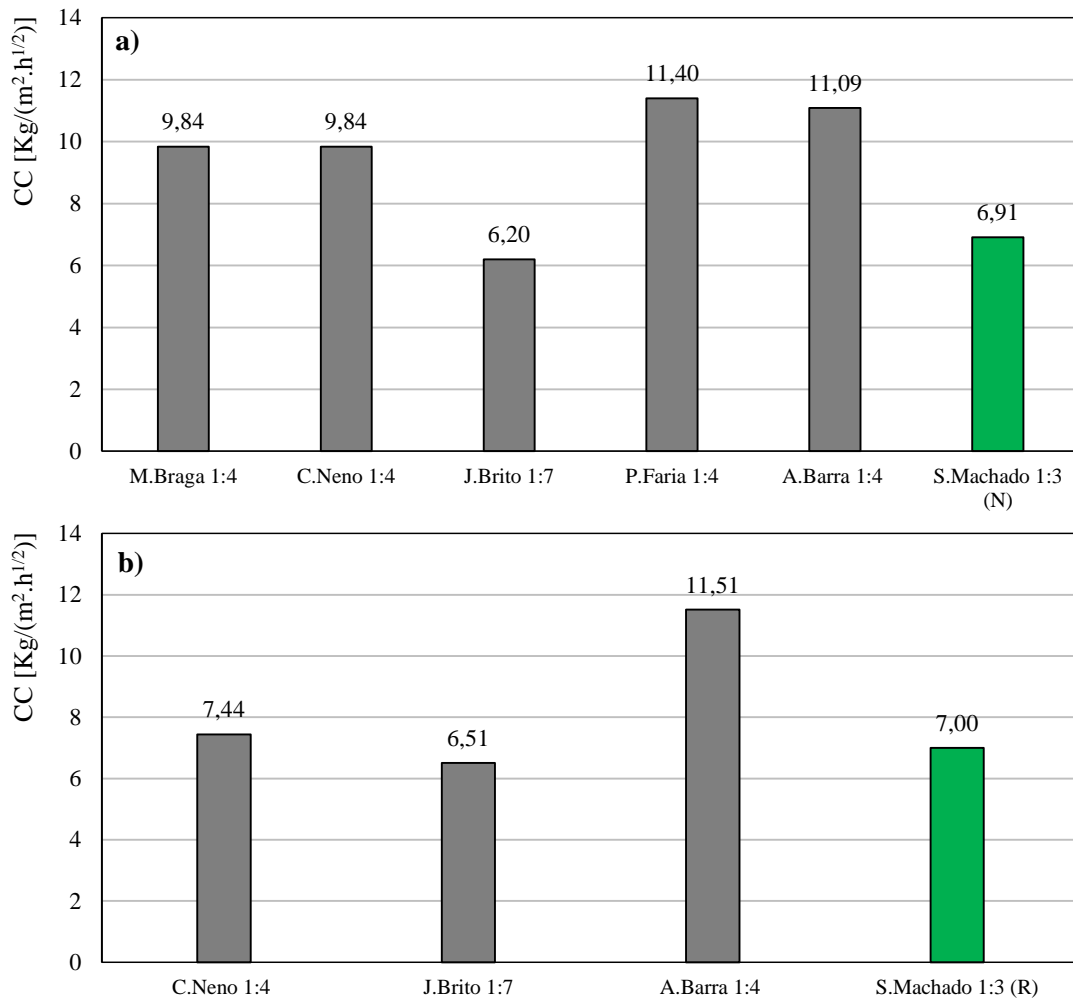


a) Argamassas com agregados normalizados e naturais; b) Argamassas com agregados reciclados  
 Figura 5.8 – Resultados do ensaio de aderência ao suporte

Na figura 5.8 verifica-se que, o resultado obtido na presente dissertação relativamente à argamassa com agregados normalizados enquadra-se nos resultados dos outros autores. No entanto, para a argamassa com agregados reciclados (R) não foi possível efetuar o ensaio, pois esta argamassa destacou-se por inteiro do suporte em tijolo cerâmico, conduzindo assim a um resultado nulo neste ensaio.

### ***Absorção de água por capilaridade***

Na figura 5.9 apresentam-se os resultados do coeficiente de capilaridade das argamassas referência e ensaiadas por outros autores, obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade.



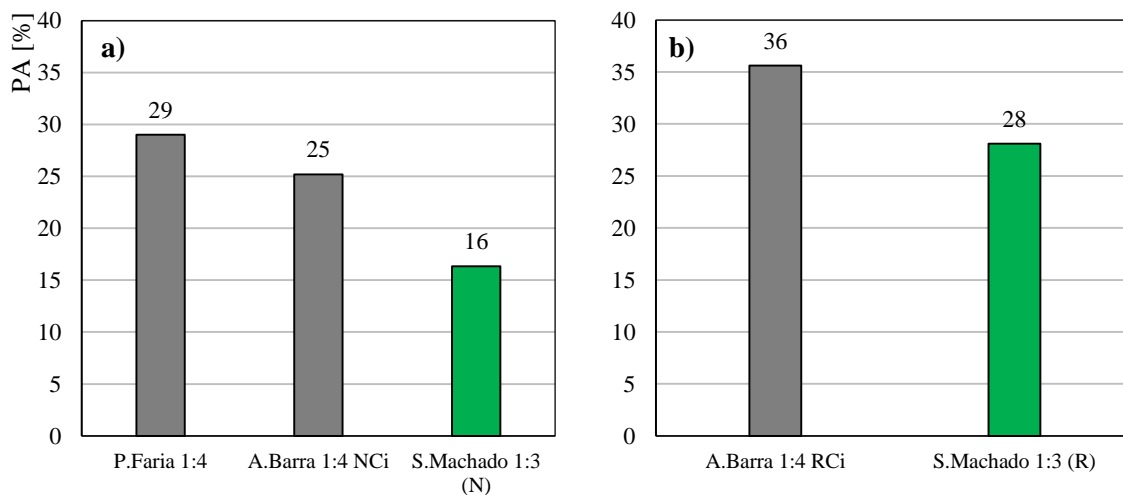
a) Argamassas com agregados normalizados e naturais; b) Argamassas com agregados reciclados  
 Figura 5.9 - Resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade – coeficiente de capilaridade

Através da figura 5.9, observa-se que os valores do coeficiente de absorção de água por capilaridade obtidos pela maioria dos outros autores são superiores ao valor obtido na presente dissertação para as argamassas com agregados normalizado (N), o que advém de valores superiores de porosidade (figura 5.10). Seguindo o mesmo raciocínio, constata-se que as argamassas com agregados reciclados estudadas por A.Barra apresentam maiores valores de porosidade e de coeficiente por capilaridade.

Verifica-se também que os valores do coeficiente de capilaridade das argamassas com agregados normalizados ou naturais e as argamassas com agregados reciclados do mesmo autor não apresentam diferenças significativas entre si; por exemplo, A.Barra, o caso de comparação mais direta (apesar dos traços distintos) o valor do CC manteve-se relativamente constante entre as duas argamassas distintas, tal como se verifica na presente dissertação. Significa assim que, a utilização dos agregados reciclados não implica um aumento da velocidade de absorção de água, mesmo estas argamassas apresentando maiores porosidades.

### **Porosidade aberta**

Na figura 5.10 apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de porosidade aberta das argamassas de referência e das argamassas ensaiadas por outros autores.



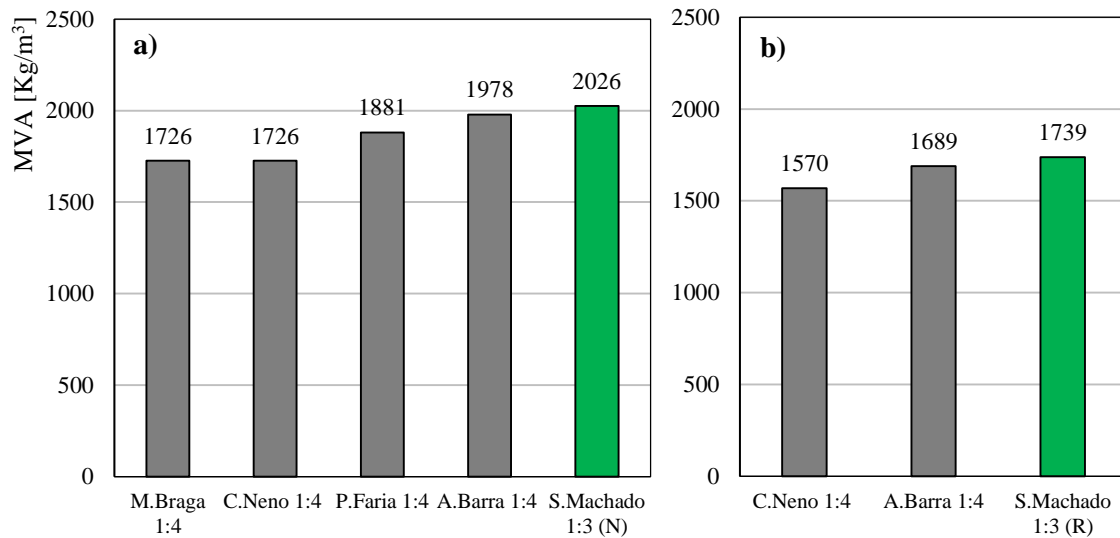
a) Argamassas com agregados normalizados e naturais; b) Argamassas com agregados reciclados  
 Figura 5.10 - Resultados obtidos no ensaio de porosidade aberta das argamassas de referência

Apesar da comparação deste trabalho com os outros autores ser indireta, devido aos fatores já referidos (diferentes traços, composições entre outros), verifica-se que os valores são da mesma ordem de grandeza, não existindo diferenças muito díspares.

No trabalho de A.Barra [Barra, 2011] verifica-se que as argamassas com agregado reciclado apresentam valores de porosidade superiores às argamassas com agregados normalizados, e por sua vez menores resistências mecânicas.

### **Massa volúmica aparente**

Na figura 5.11 apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de massa volúmica aparente das argamassas de referência e das argamassas ensaiadas por outros autores.



a) Argamassas com agregados normalizados e naturais; b) Argamassas com agregados reciclados  
 Figura 5.10 - Resultados obtidos no ensaio de massa volúmica aparente das argamassas

Através das figuras 5.5 5.6, 5.9 e 5.12, verifica-se a mesma tendência entre as argamassas: maiores valores de massa volúmica implicam menores valores de porosidade e resistências mecânicas superiores.

Em suma, apesar de todos os fatores que impedem uma comparação direta dos resultados obtidos na presente dissertação com os obtidos pelos autores referidos, principalmente devido às características intrínsecas das matérias-primas e ao traço volumétrico, de uma forma geral, verifica-se que os resultados obtidos encontram-se dentro da mesma ordem de grandeza.

### 5.3. Tendências de resultados na presente linha de investigação

Nesta secção relacionam-se os resultados obtidos na presente campanha experimental com os trabalhos desenvolvidos no âmbito da linha de investigação associada ao reaproveitamento de resíduos na produção de argamassas (tabela 2.30). Esta análise é realizada de forma qualitativa, ou seja, são analisadas apenas as tendências, visto que aqueles trabalhos diferenciam-se da presente dissertação no tipo de ligante (cimento em vez de cal aérea) e na formulação das argamassas<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> No trabalho de investigação de A. Barra [Barra, 2011] utiliza-se cimento como ligante, tendo sido comparado quantitativamente na secção 4.4; no entanto, também foi incluído na comparação qualitativa da presente secção.

Na tabela 5.1 são apresentadas as designações adotadas (iniciais dos nomes de cada autora)<sup>10</sup> e as composições das argamassas estudadas nos diferentes trabalhos que serviram de comparação com o presente trabalho.

Tabela 5.1 – Designações e composições das argamassas estudadas nos diferentes trabalhos da linha de investigação em comparação com a presente dissertação

Autora	Designação da argamassa	Designação simplificada	Ligante			Agregados		Cinzas volantes	
			Cal aérea	Cimento	Normalizado	Reciclado	Conformes	Não conformes	
A.Barra, 2011	NCi	AB_0		•	•				
	RCi	AB_1		•		•			
R.Santos, 2013	100R0N	RS_0	•			•			
	0R100N	RS_1	•		•				
A.Mana, 2013	A0	AM_0	•		•				
	A1	AM_1	•		•		•		
	A3	AM_2	•		•				•
R.Frutuoso, 2013	A0	RF_0	•		•				
	A1	RF_1	•			•			
	A2	RF_2	•		•		•		
	A3	RF_3	•		•				•
	A4	RF_4	•			•	•		
	A5	RF_5	•			•			•
	A6	RF_6	•		•	•	•		
	A7	RF_7	•		•	•			•
S.Machado, 2014	N	N		•	•				
	R	R		•		•			
	NVc	NVc		•	•		•		
	NVnc	NVnc		•	•				•
	RVc	RVc		•		•	•		
	RVnc	RVnc		•		•			•
	NRVc	NRVc		•	•	•	•		
	NRVnc	NRVnc		•	•	•			•

<sup>10</sup> Não obstante à alteração das designações dos outros trabalhos, relativamente às correspondentes da presente dissertação, optou-se por manter as originais, consideradas ao longo da mesma.

As tendências dos resultados são analisadas através das argamassas de referência de cada trabalho, ou seja, é comparado o resultado em termos de percentagem de aumento ou diminuição do valor de cada característica estudada, face ao resultado da respetiva argamassa de referência. Para melhor compreensão descrevem-se dois exemplos:

- A argamassa com agregado fino reciclado (RS\_1) produzida por R. Santos [Santos, 2013], é comparada com a sua argamassa de referência, ou seja, com a argamassa de agregado fino normalizado (RS\_0);
- A argamassa de agregado fino normalizado com cinzas volantes não conformes (RF\_3) produzida por R. Frutuoso [Frutuoso, 2013], é comparada com a argamassa de referência do seu trabalho, constituída por agregado fino normalizado sem cinzas volantes (RF\_0).

Devido ao facto de existirem dois vetores de investigação, componentes pozolânicos e agregados finos reciclados, as tendências são analisadas separadamente por cada vetor de investigação<sup>11</sup>:

- Argamassas de agregado fino reciclado comparadas com argamassas de agregado fino normalizado do respetivo trabalho (tabela 5.2);
- Argamassas de agregado fino normalizado com cinzas volantes conformes e não conformes comparadas com argamassas de agregado fino normalizado sem cinzas volantes do respetivo trabalho (tabela 5.3);
- Argamassas de agregado fino reciclado com cinzas volantes conformes e não conformes comparadas com argamassas de agregado fino reciclado sem cinzas volantes do respetivo trabalho (tabela 5.4).

As tendências são analisadas relativamente ao aumento ou diminuição, em percentagens. Para tal, criou-se uma escala de simbologia: um sinal “+” significa um aumento entre 10 a 49%; dois sinais “++” representa um aumento entre 50 a 100% e três sinais “+++” um aumento superior a 100%. De igual forma, se interpreta as diminuições, traduzidas pelos sinais “-“, “--“ e “---“; em situações de pouca variação (até 9%) considera-se valor constante “Ø” e quando o ensaio não foi realizado “//”.

Na tabela 5.2 apresentam-se as tendências de aumento ou diminuição verificadas nas argamassas de agregado fino reciclado produzidas por cada autora, relativamente às argamassas com agregado fino normalizado (argamassa de referência) do trabalho correspondente.

<sup>11</sup> As argamassas constituídas pela mistura de ambos os agregados (NRVc e NRVnc) não foram consideradas para análise quantitativa, pela razão de não apresentarem uma argamassa de referência; a maioria dos resultados varia entre as argamassas constituídas com cada um dos agregados (NVc e RVc) e (NVnc e RVnc), respetivamente.

Para uma melhor compreensão da análise das tendências apresenta-se um exemplo de interpretação: relativamente à resistência à compressão ( $R_c$ ), verifica-se que a argamassa do presente trabalho (R) apresenta uma diminuição entre 10 a 49% desta característica face à argamassa com agregados normalizados (N); a resistência à compressão da argamassa de cal aérea com agregado reciclado estudada por R. Frutuoso (RF\_1) aumentou entre 50 a 99% face à argamassa constituída por agregados normalizados (RF\_0); e assim sucessivamente.

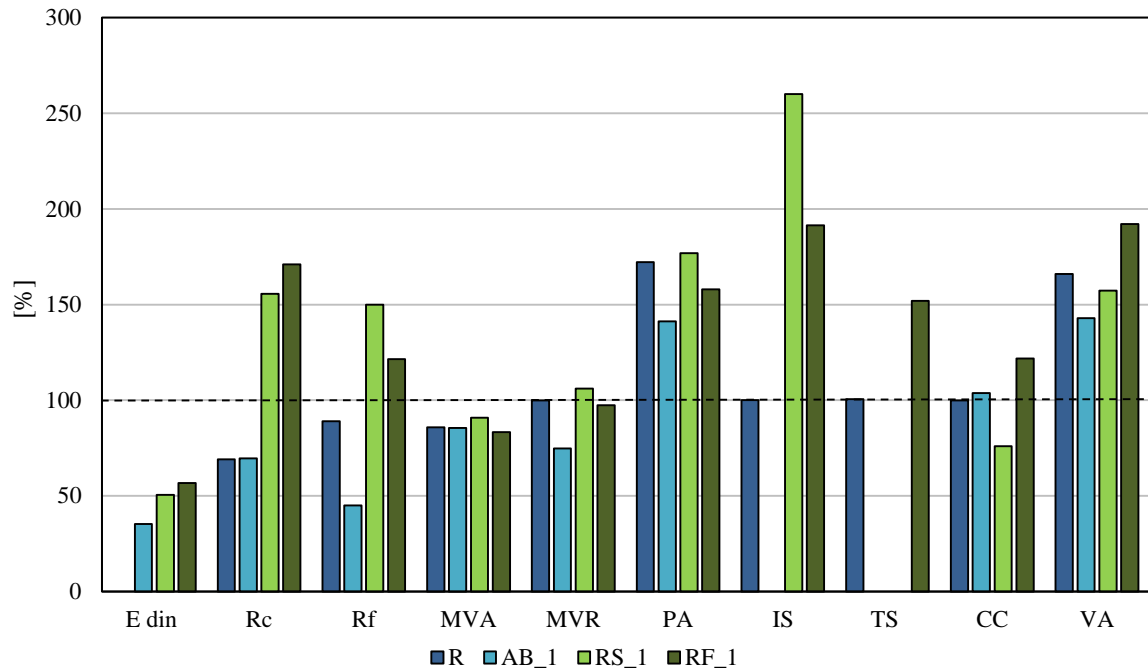
Tabela 5.2 – Análise qualitativa das características das argamassas de agregado fino reciclado relativamente às argamassas de agregado fino normalizado

Ligante	Argamassas referência	Arg.	a/l	$E_{din}$	$R_c$	$R_t$	MVA	MVR	PA	IS	TS	CC	VA
cimento	N	R	+	//	–	–	–	Ø	++	Ø	Ø	Ø	++
	AB_0	AB_1	+	--	–	--	–	–	+	//	//	Ø	+
cal aérea	RS_0	RS_1	Ø	–	++	+	Ø	Ø	+	+++	//	–	++
	RF_0	RF_1	Ø	–	++	+	–	Ø	++	++	+	+	++

Ø: 0 a 9%; //: sem ensaio; +: 10 a 49%; ++: 50 a 99%; +++: mais que 100%; –: 10 a 49%; – –: 50 a 99%; -- --: mais que 100%

Na figura 5.11 apresenta-se uma visualização gráfica das tendências das argamassas de agregado fino reciclado produzidas por cada autora, relativamente às argamassas com agregado fino normalizado (argamassa de referência) do trabalho correspondente. Esta análise gráfica foi conseguida a partir do valor da argamassa de referência para cada característica que corresponde a 100%, e através deste, quantifica-se o aumento ou diminuição da argamassa analisada. Para melhor compreensão apresenta-se um exemplo de interpretação: as argamassas de cimento (R e AB\_1) apresentam uma diminuição (inferior a 100%) da resistência à compressão ( $R_c$ ) face à correspondente argamassa de referência; contudo, nas argamassas com cal aérea (RF\_1 e RS\_1) a resistência à compressão aumentou (superior a 100%) relativamente à correspondente argamassa de referência.





Cor azul corresponde às argamassas com cimento; cor verde às argamassas com cal aérea;  
 Figura 5.11 - Análise qualitativa das características das argamassas de agregado fino reciclado relativamente às argamassas de agregado fino normalizado

Na tabela 5.2 e figura 5.11 verifica-se que, com a utilização de agregados reciclados a porosidade aumenta consideravelmente em todas as argamassas; no entanto, as resistências mecânicas aumentam nas argamassas com cal (RF\_1 e RS\_1) e diminuem nas argamassas com cimento (R e AB\_1). Uma possível explicação para este fenómeno pode dever-se ao facto de uma argamassa com cimento ser mais resistente do que uma argamassa de cal, e ao utilizar agregados reciclados essa resistência é diminuída; no entanto na cal aérea resistência é muito baixa, a grande dimensão dos agregados contribui positivamente aumentando as resistências mecânicas.

Os agregados reciclados ao conduzirem a um aumento da porosidade, implicam um aumento da quantidade de água absorvida por capilaridade (VA).

O coeficiente de capilaridade (CC) manteve-se constante nas argamassas com cimento; contudo nas argamassas de cal não existe uma tendência clara relativamente a este parâmetro. As restantes características acompanham a mesma tendência em todas as argamassas.

Na tabela 5.3 apresentam-se as tendências verificadas das argamassas de agregado fino normalizado com cinzas volantes conformes e não conformes, produzidas por cada autora, relativamente às argamassas de referência, constituídas por agregado fino normalizado sem cinzas volantes, do trabalho correspondente.

Tabela 5.3 – Análise qualitativa das características das argamassas de agregado fino reciclado com cinzas volantes relativamente às argamassas de agregado fino normalizado sem cinzas volantes

Cv.	Ligante	Arg. Ref.	Arg.	a/l	E <sub>din</sub>	R <sub>c</sub>	R <sub>f</sub>	MVA	MVR	PA	IS	TS	CC	VA
Conformes	cimento	N	NVc	Ø	//	–	–	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	+	+
	cal aérea	RF_0	RF_2	–	+	+	++	Ø	Ø	–	+	–	–	Ø
		AM_0	AM_1	Ø	+++	+	+++	Ø	Ø	–	+	–	–	–
Não Conf.	cimento	N	NVnc	+	//	–	–	Ø	Ø	+	–	Ø	+	+
	cal aérea	RF_0	RF_3	–	Ø	–	–	Ø	Ø	Ø	+	–	–	Ø
		AM_0	AM_2	Ø	++	Ø	+++	Ø	Ø	–	+	Ø	Ø	Ø

Ø: 0 a 9%; //: sem ensaio; +: 10 a 49%; ++: 50 a 99%; +++: mais que 100%; –: 10 a 49%; – –: 50 a 99%; – – –: mais que 100%

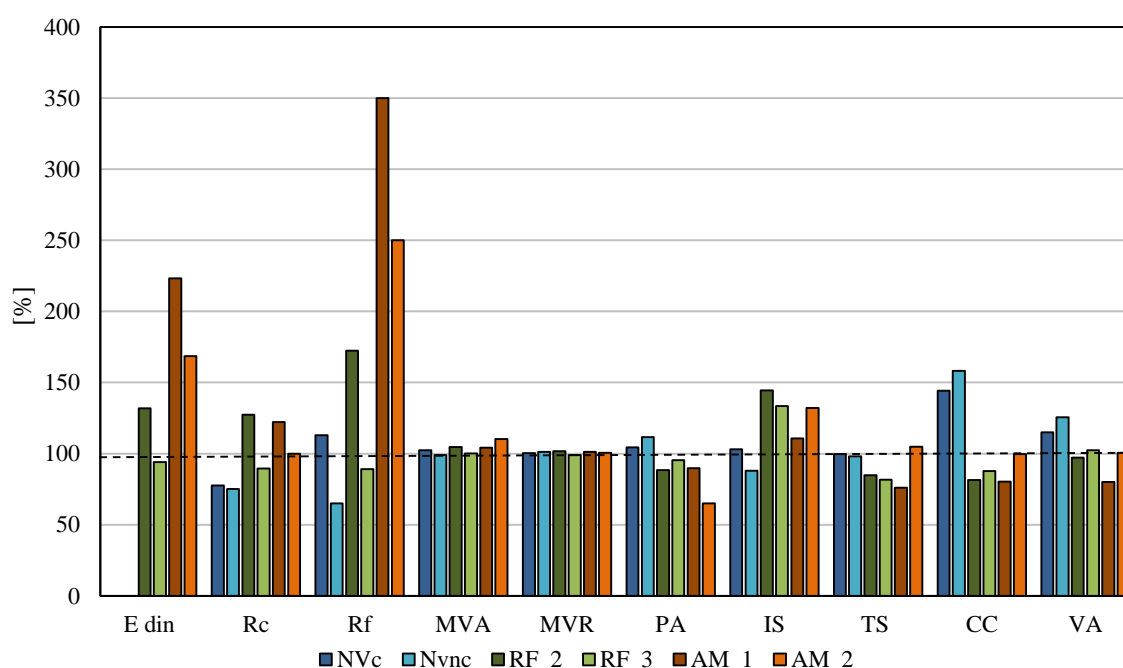


Figura 5.12 - Análise qualitativa das características das argamassas de agregado fino reciclado com cinzas volantes relativamente às argamassas de agregado fino normalizado sem cinzas volantes

Através da tabela 5.3 e da figura 5.12, constata-se que, relativamente ao comportamento mecânico, as resistências mecânicas diminuem nas argamassas com cimento e cinzas volantes conformes e aumentam nas argamassas com cal aérea e cinzas conformes; nas argamassas com cinzas não conformes não existe uma tendência clara entre os dois trabalhos de cal aérea (RF\_3 e AM\_2). No entanto, as argamassas do trabalho desenvolvido por R. Frutuoso [Frutuoso, 2013] apresentam a mesma tendência que a presente dissertação: diminuição das resistências com a substituição do ligante por cinzas volantes não conformes. A maioritária tendência da diminuição das resistências nas argamassas com cimento e aumento nas argamassas com cal pode ser justificada pela

porosidade, que aumenta nas argamassas de cimento quando se adicionam cinzas e diminui nas argamassas de cal e cinzas, relativamente às correspondentes argamassas de referência.

Quanto ao módulo de elasticidade dinâmico, também não existe uma tendência clara nos trabalhos de argamassas com cal, sendo que nas argamassas produzidas por A. Mana [Mana, 2013] este parâmetro aumenta significativamente, o que não se verifica no trabalho de R. Frutuoso [Frutuoso, 2013]. Relativamente às características físicas, as massas volúmicas apresentam a mesma tendência, mantendo-se relativamente constantes em todas as argamassas; a porosidade aumenta nas argamassas com cimento e cinzas e decresce nas argamassas com cal, o que implica diretamente o comportamento mecânico destas argamassas. No comportamento face à ação da água, a tendência é maioritariamente contrária entre argamassas de cimento e cal, sendo que o coeficiente de capilaridade e o valor assintótico aumentaram mais nas argamassas de cimento com cinzas do que nas argamassas de cal e cinzas relativamente às argamassas de referência. Este facto pode dever-se ao maior aumento da porosidade apresentada pelas argamassas de cimento comparativamente com as argamassas de cal, como também pela diferente distribuição do tamanho dos poros destas argamassas.

Na tabela 5.4 apresentam-se as tendências verificadas das argamassas de agregado fino reciclado com cinzas volantes conformes e não conformes, produzidas por cada autor, relativamente às argamassas com agregado fino reciclado sem cinzas volantes do trabalho correspondente.

Tabela 5.4 – Análise qualitativa das características das argamassas de agregado fino reciclado com cinzas relativamente às argamassas de agregado fino reciclado sem cinzas

Cv.	ligante	Arg. Ref.	Arg.	a/l	E <sub>din</sub>	R <sub>c</sub>	R <sub>f</sub>	MVA	MVR	PA	IS	TS	CC	VA
Conf.	cimento	R	RVc	Ø	//	–	–	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø
	cal aérea	RF_1	RF_4	+	Ø	Ø	+	Ø	Ø	Ø	+	–	Ø	Ø
Não Conf.	cimento	R	RVnc	Ø	+++	–	–	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø
	cal aérea	RF_1	RF_5	+	Ø	Ø	+	Ø	Ø	Ø	+	–	+	Ø

Ø: 0 a 9%; //: sem ensaio; +: 10 a 49%; ++: 50 a 99%; +++: mais que 100%; –: 10 a 49%; – –: 50 a 99%; – – –: mais que 100%

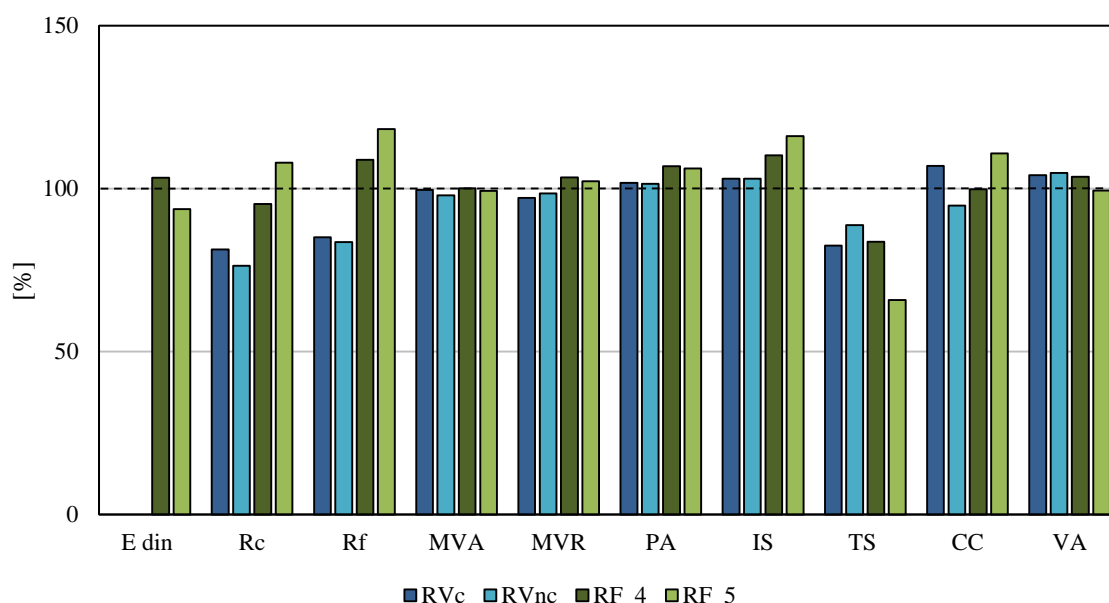


Figura 5.13 - Análise qualitativa das características das argamassas de agregado fino reciclado com cinzas relativamente às argamassas de agregado fino reciclado sem cinzas

Através da análise da tabela 5.4 e da figura 5.13 verifica-se uma tendência contrária relativamente às resistências mecânicas, entre argamassas de cimento e cal, com agregados reciclados e cinzas conformes e não conformes: nas argamassas com cimento as resistências tendem a aumentar com a utilização de cinzas e diminuíram nas argamassas de cal face à argamassa de referência sem cinzas. Todas as restantes características exibem diferenças pouco significativas, podendo dizer-se que apresentam relativamente a mesma tendência.

# CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 6.1. Considerações iniciais

A presente dissertação teve como objetivo analisar as características físicas e mecânicas de argamassas constituídas por agregados provenientes de resíduos de construção e demolição, e com substituição parcial do cimento por cinzas volantes.

Para este efeito, foram moldados e ensaiados 68 provetes<sup>12</sup> de argamassa de cimento com agregado fino normalizado, agregado fino reciclado e uma combinação entre os dois tipos de agregados; procedeu-se à substituição de 1/6 do volume de cimento por cinzas volantes conformes e não conformes, à exceção de duas argamassas produzidas sem adição pozzolânica (argamassas de referência). Todas as argamassas foram produzidas ao traço volumétrico 1:3 e, aos 28 dias de cura, avaliou-se o seu comportamento físico e mecânico.

Neste capítulo fazem-se comentários finais ao trabalho desenvolvido, sintetizam-se as principais conclusões obtidas, confrontam-se os objetivos propostos com os obtidos e referem-se possíveis desenvolvimentos futuros.

### 6.2. Comentários finais

Relativamente ao comportamento mecânico das argamassas, observou-se que a utilização de agregados reciclados diminui o módulo de elasticidade e as resistências mecânicas, estando esta diminuição relacionada com a diminuição de compacidade e consequente aumento da porosidade.

---

<sup>12</sup> Inicialmente eram previstos 56 provetes, mas devido ao fenómeno de presa rápida, produziram-se mais 12 provetes.

Os resultados obtidos no ensaio de aderência ao suporte, quer pelo destacamento total das argamassas, quer pelos valores reduzidos que se obteve, permitem concluir que as argamassas estudadas não apresentam boa aderência, confirmando a sua inadequada aplicação em revestimentos de edifícios.

Relativamente ao comportamento físico, as argamassas com agregados reciclados, por apresentarem maiores porosidades, absorvem maiores quantidades de água. No entanto, apesar do aumento de porosidade, a utilização de agregados reciclados não implica maiores velocidades de absorção de água por capilaridade; a secagem não apresentou variações significativas entre as argamassas estudadas.

A heterogeneidade da composição e da granulometria dos agregados reciclados pode ter condicionado e influenciado os resultados, na medida que o aumento da porosidade, relacionado com as maiores dimensões das partículas do agregado origina uma diminuição das resistências mecânicas. Por outro lado, a presença de elevadas percentagens de sulfatos nos agregados reciclados, que condicionou a compactação, pode provocar problemas graves conduzindo à deterioração das argamassas.

A substituição parcial do cimento por cinzas volantes aumenta a porosidade em 1 a 2%, e consequentemente diminui as resistências mecânicas das argamassas; por constituírem argamassas com poros de menores dimensões (baseado nos resultados obtidos nos ensaios de capilaridade), as argamassas com os agregados normalizados e cinzas absorvem água mais rapidamente do que sem cinzas. No entanto, as cinzas nas argamassas com agregado, reciclado não conduziram a maiores velocidades de absorção, o que se pode considerar um aspeto positivo.

Os diferentes processos de recolha e armazenamento, e a origem das cinzas volantes influenciam consideravelmente as propriedades físicas e mecânicas das argamassas estudadas, visto que a designação, conforme e não conforme, associada às percentagens do carvão inqueimado presente na amostra, pode condicionar os resultados.

A substituição parcial do ligante de argamassas por cinzas volantes pode resultar, assim, em argamassas mais sustentáveis. Além disso, a substituição parcial do cimento por componentes pozzolânicos implicam ainda economia de energia e redução do custo de fabricação do cimento, tendo ainda implicações ecológicas, pois contribuem para um melhor aproveitamento dos resíduos industriais poluidores. Assim, conclui-se que esta substituição pode ser vantajosa, uma vez que, ao diminuir a quantidade de cimento na formulação das argamassas, tornando-as mais “económicas”, a produção de cimento é diminuída, favorecendo o meio ambiente no sentido de menor poluição industrial. Assim, pode-se afirmar que o aproveitar resíduos aparentemente inutilizados (cinzas volantes não conformes) como substituto parcial do cimento conduz a resultados, de certa forma, favoráveis à sua aplicação.

Numa análise global do trabalho desenvolvido, conclui-se que a avaliação dos resultados foi, condicionada pela heterogeneidade da composição das matérias-primas, dificultando por vezes a atribuição e justificação de alguns parâmetros.

De forma a compreender e justificar certas tendências, deveria ter sido realizada uma análise mais profunda sobre a caracterização química e mineralógica das matérias-primas utilizadas, principalmente dos agregados e das cinzas volantes, o que permitiria uma comparação mais direta com artigos internacionais e outros trabalhos realizados no mesmo âmbito.

Nas argamassas com agregado reciclado, a variabilidade dimensional deste agregado pode ter condicionado os resultados. De forma a minimizar este facto, uma seleção de determinadas granulometrias previamente definidas, através da peneiração do material, permitindo a execução de uma curva granulométrica adequada, poderia conduzir a melhores resultados, nomeadamente menores porosidades e, consequentemente, aumento da resistência.

Relativamente à estrutura porosa, seria interessante avaliar as dimensões e a distribuição dos poros, contribuindo para um melhor conhecimento e compreensão do comportamento apresentado pelas argamassas ao nível da absorção e secagem de água.

Os resultados obtidos encorajam a continuação deste estudo, visto que se recorre à poupança de recursos naturais, que, quando substituídos por material dito “secundário” (reciclados), apresentam características que podem ser melhoradas e aproveitadas.

A substituição de agregados naturais por agregados reciclados e a substituição parcial de cimento por cinzas volantes, tem a vantagem de reduzir a dependência dos materiais primários, diminuindo o volume de resíduos produzidos e, consequentemente, a quantidade de material enviado para aterro.

Admite-se assim, como uma solução viável a utilização de agregado fino reciclado e cinzas volantes não conformes em soluções construtivas não estruturais, nomeadamente regularização de pisos e enchimento.

Este trabalho de investigação permitiu aprofundar o conhecimento das propriedades de argamassas com incorporação de agregados provenientes de resíduos de construção e subprodutos industriais, em substituição da areia e do cimento, respetivamente, possibilitando uma redução da exploração de recursos naturais finito e emissões de CO<sub>2</sub>.

Encontrando-se este estudo envolvido num projeto de uma empresa de gestão de resíduos, espera-se que este contribua significativamente para o desenvolvimento sustentável da indústria da construção, com principal incidência no desenvolvimento tecnológico da indústria da reciclagem de agregados provenientes de RCD.

### **6.3. Propostas para desenvolvimentos futuros**

Para dar continuidade a este trabalho, seria interessante aprofundar alguns aspectos, relacionados principalmente com a composição das matérias-primas. Assim, como desenvolvimentos futuros, propõe-se um estudo sobre:

- Caracterização química e mineralógica dos agregados reciclados para uma melhor compreensão da sua influência nas características ensaiadas na presente dissertação;
- Caracterização mais criteriosa das cinzas volantes designadamente da superfície específica, reatividade pozolânica, composição química e mineralógica;
- Durabilidade e comportamento a longo prazo das argamassas relativamente à influência da presença de sulfatos;
- Analisar a nível microscópico os compostos formados nas argamassas com cinzas volantes e compreender como interagem com o cimento ao nível das reações pozolânicas;
- Avaliar o comportamento de argamassas com agregados reciclados e substituição do cimento por cinzas volantes em diferentes percentagens, de forma a obter a percentagem de substituição que conduz às melhores características;
- Realizar os ensaios de caracterização física e mecânica das argamassas em idades diferentes para analisar a sua evolução ao longo do tempo, particularmente das reações pozolânicas;
- Realizar ensaios de porosimetria de mercúrio com vista ao estudo da porometria das argamassas;
- Realizar estudos sobre procedimentos mais específicos de triagem dos resíduos.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, G. (2004) – *Estudo de argamassas com agregados reciclados contaminados com gesso de construção*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo.

AHMARUZZAMAN, M. (2010) - *A review on the utilization of fly ash, Progress in Energy and Combustion Science*, 36, p. 327–363, Elsevier.

ALGARVIO, D. (2009) – *Reciclagem de resíduos de construção e demolição: contribuição para controlo do processo*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Lisboa.

AMORIM, P. (2008) – *Influência das condições de cura no desempenho em termos de durabilidade de betões com agregados reciclados de betão*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

ANGULO, S. (2005) – *Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos*, Tese de doutoramento, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

APA (2013) –

<http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=197&sub3ref=283>, consultado em Julho, 2013

BARRA, A. (2011) – *Caracterização física e mecânica de argamassas não estruturais com agregados finos reciclados*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

BRAGA, M.; BRITO, J.; VEIGA, R. (2012) - *Incorporation of fine concrete aggregates in mortars*, *Construction and Building Materials*, 36, p.960–968, Elsevier.

BRITO, J.; FERNÁNDEZ, J.; LÓPEZ, M.; AYUSO, J.; JIMÉNEZ, J. (2013) - *Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing*, Construction and Building Materials, 40, p. 679–690, Elsevier.

BORAL (2013) - [http://www.boral.com.au/Ash/case\\_study\\_holcombe\\_hill.asp](http://www.boral.com.au/Ash/case_study_holcombe_hill.asp), consultado em Julho, 2013.

BOTAS, S. (2009) – *Avaliação do comportamento de argamassas em climas frios*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Lisboa.

CAMÕES, A. (2002) – *Betões de elevado desempenho com elevado volume de cinzas volantes*. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho.

CASTRO, W. (2010) - *Separação, reutilização e reciclagem de resíduos da demolição de edifícios*, Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro.

CHEN, X.; WU, S. (2013) - *Influence of water-to-cement ratio and curing period on pore structure of cement mortar*, Construction and Building Materials, 38, p 804–812, Elsevier.

CHINDAPRASIRTA, P.; JATURAPITAKKULB, C.; SINSIRI, T. (2007) - *Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste*, Construction and Building Materials, 21, p.1534–1541, Elsevier

CHRISTY, C.; TENSING, D. (2010) - *Effect of Class-F fly ash as partial replacement with cement and fine aggregate in mortar*, Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, 17, p. 140-144

CIMPOR (2013) –

[http://www.cimporportugal.pt/marcas\\_home.aspx?id\\_gama=10&lang=pt&id\\_object=1175&name=Betoes](http://www.cimporportugal.pt/marcas_home.aspx?id_gama=10&lang=pt&id_object=1175&name=Betoes), consultado em Agosto, 2013.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN 1999c) – EN 1015 -3– *Methods of test for mortar for masonry. Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*, Brussels.

CEN (1999a) – EN 1015-11 – *Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*, Brussels.

CEN (1999b) – EN 1015-12 – *Methods of test for mortar for masonry. Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates*, Brussels.

CEN (2002) – EN 1015-18 – *Methods of test for mortars for masonry. Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*, Brussels.

CORINALDESI, V. (2009) - *Mechanical behavior of masonry assemblages manufactured with recycled-aggregate mortars*, Cement & Concrete Composites, 31, p.505–510

DURÃO, V. (2004) - *Resíduos de Construção e Demolição: Testes de Produção de Resíduos de Construção e Demolição em Condições de Simulação de Obra*, Trabalho realizado no âmbito de um estágio curricular CEIFA Ambiente, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Lisboa.

EDP (2010) – *Declaração ambiental: Central termoelétrica de Sines*, Direção de produção de Sines.

FARIA, P. (2004) – *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas: Contribuição para o estudo da influência dos ligantes*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Lisboa.

FARIA, P.; SILVA, V.; FLORES-COLEN, I. (2012) – *Argamassas de cal hidráulica natural e pozolanas artificiais: avaliação laboratorial*. 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS, Coimbra

FRAGA, C. (2012) – *Guia para a gestão de resíduos de construção e demolição (RCD) em obras (versão 1)*, Trabalho realizado para o Laboratório Regional de Engenharia Civil, Açores

FREIRE, A.; José NEVES; ROQUE, A.; MARTINS, I.; ANTUNES, M.; FARIA, G. (2013) - *Aplicação de resíduos de construção e demolição (RCD) em camadas granulares de pavimentos rodoviários validada em trecho piloto*, LNEC, Lisboa.

FRUTUOSO, R. (2013) – *Influência de agregados provenientes de RCD e cinzas volantes não conformes em argamassas de cal aérea*, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa.

GONÇALVES, P. (2007) – *Betão com agregados reciclados: Análise comentada da legislação existente*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTATISTICA (INE) (2013) –

[http://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine\\_indicadores&indOcorrCod=0006063&contexto=bd&selTab=tab2](http://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_indicadores&indOcorrCod=0006063&contexto=bd&selTab=tab2), consultado em Junho, 2013.

INSTITUTO PORTUGUES DA QUALIDADE (IPQ) (2000) NP EN 1097-3 – *Ensaio para determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – Parte 3: Método para determinação da massa volúmica e dos vazios*, Caparica.

IPQ (2000) - NP EN 933-1 – *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica – Método de peneiração*, Caparica

IPQ (2001) - NP EN 197-1 – *Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes*, Caparica.

IPQ (2006) - NP EN 450-2 – *Cinzas volantes para betão. Parte 2: Avaliação da conformidade*, Caparica

IPQ (2007) - NP EN 14146 – *Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (através da medição da frequência de ressonância fundamental)*, Caparica.

IPQ (2008) - NP EN 1936 – *Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta*, Caparica.

IPQ (2010) - NP 4220 – *Pozolanas para betão, argamassa e caldas. Definições, requisitos e verificação da conformidade*, Caparica.

IPQ (2012) - NP EN 450 - 1 – *Cinzas volantes para betão. Parte 1: Definição, especificações e critérios de conformidade*, Caparica.

JÚNIOR, C. (2011) - *Estudo da influência do calcário cru e cinzas volantes nas propriedades físico-químicas e mecânicas do cimento portland produzido em Moçambique*, Universidade Eduardo Mondlane, Faculdade de Ciências, Maputo

LANAS, J.; BERNAL, J.; BELLO, M.; GALINDO, J. (2004) – *Study of the mechanical behavior of masonry repair lime based mortars cured and exposed under different conditions*, Cement and Concrete Research, 36, p. 2191-2201, Elsevier.

LANAS, J.; ALVAREZ, J. (2003) – Masonry repair lime-based mortars: factors affecting the mechanical behavior, *Cement and Concrete Research*, 33, p.1867-1876, Elsevier.

LOURENCI, S. (2003) – *Caracterização de argamassas de revestimentos fabricadas com materiais alternativos*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville.

LRP (2012) - *Living Report Planet: Aumento do consumo e uso de recursos por uma população em crescimento exerce uma pressão insustentável sobre o nosso Planeta*, World Wide Fund.

MÁLIA, M. (2010) – *Indicadores de Resíduos de Construção e Demolição*, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

MANA, A.(2013) – *Influência das cinzas volantes não conformes em argamassas de cal aérea* Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa.

NETTO, R. (2006) – *Materiais Pozolânicos*, Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte

MARGALHA, G. (2010) - *Documento de apoio às aulas de Conservação e Recuperação do Património*, Universidade de Évora.

MIRANDA, L.; SELMO, S. (2006) - *CDW recycled aggregate renderings: Part I – Analysis of the effect of materials finer than 75 µm on mortar properties*, *Construction and Building Materials*, 20 p. 615–624, Elsevier.

MOTA, I. et al (2005) – *Estratégia Nacional para o desenvolvimento sustentável (ENDS)*, 2005-2015.

NENO, C. (2010) – *Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos provenientes da trituração do betão – integração de RCD*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

PEDROZO, R. (2008) – *Influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedades de argamassas e concretos*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

PEGOP (2011) – *Declaração ambiental: Central termoelétrica do Pego*, Tejoenergia.

PEREIRA, T. (2008) – *Optimização das características de humedecimento e secagem de argamassas*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

PINHO, F. (2013) – *Utilização de agregados provenientes de “RCD” e cinzas volantes não-conformes em argamassas não estruturais*, Investigação recente na FCT/UNL, 2º Congresso Internacional da Habitação no Espaço Lusófono e 1º Congresso Construção e Reabilitação de Edifícios no Espaço Lusófono, 13-15 Março, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

PORTARIA n°209/2004. Diário da República – I Série B, n°53, 3 de Março, 2004.

QUERCUS (2013) – <http://conservacao.quercusancn.pt/content/view/46/70/>, consultado em Junho 2013.

RATO, V. (2006) – *Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Lisboa.

RILEM TC 25-PEM (1980) – *Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods*. Test n° II.5 – Evaporation curve. Materials & Structures, 13, 204-207.

SANTOS, R. (2013) – *Influência de agregados reciclados provenientes de RCD no desempenho de argamassas de cal aérea*, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa.

SECIL (2013) - <http://www.secil.pt/pdf/CEMIIBL325N.pdf> – Ficha técnica sobre o cimento Portland de calcário CEM II/B-L 32,5 N, consultado em Agosto, 2013.

SGR (2013) - <http://www.sgr.pt/>, consultado em Julho, 2013.

SGR (2011) - *Procedimento da Gestão da produção (RCD)*, 5, p 1-16, SGR ambiente.

SILVA, L. (2008) – *Possibilidades de utilização de agregados de resíduos de construção e demolição na construção de edifícios correntes*, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

SILVA, P. (2011) – *Princípios para a eficiência dos sistemas de gestão de resíduos de construção e demolição*, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Lisboa.

SIQUEIRA, J.; SOUZA, C.; SOUZA, J. (2012) - *Reaproveitamento de cinzas de carvão mineral na formulação de argamassas*, Cerâmica, 58, no.346, website:

[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132012000200020&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132012000200020&script=sci_arttext), consultado em Janeiro, 2014.

SOUSA COUTINHO, A. (1988) – *Fabrico e propriedades do betão*. Volume I. 2ª edição, LNEC, Lisboa.

SOUSA COUTINHO, J. (2002). *Ciência dos materiais. 1ª Parte – documento provisório*, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto

TEJOENERGIA (2013) - <http://www.tejoenergia.com/index.asp?art=61>, consultado em Agosto, 2013

TORKITTIKUL, P.; CHAIPANICH, A. (2010) - *Utilization of ceramic waste as fine aggregate within Portland cement and fly ash concretes*, Cement & Concrete Composites, 32, p. 440–449, Elsevier.

VEGAS, I., AZKARETE, I., JUARRERO, A., FRÍAS, M. (2009) - *Design and performance of masonry mortars made with recycled concrete aggregates*, Materiales de Construcción, 59, 295 p 5-18.

VIEIRA, F. (2012) – *Gestão dos produtos da queima do carvão em centrais térmicas*, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

YU, Z.; YE, G. (2013) - *The pore structure of cement paste blended with fly ash*, Construction and Building Materials, 45, p.30–35.

ZORDAN, S.; ÂNGULO, S.; JOHN, V., (2002) – *Desenvolvimento sustentável e a Reciclagem de Resíduos Construção Civil*, São Paulo, Brasil





**Anexo I**

**RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS  
PROVETES DE ARGAMASSA**



## 1 – CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

*Análise granulométrica dos agregados normalizados*

Tabela I.1 - Resultados médios da curva do agregado fino normalizado

Malha [mm]	Peneiro	Retido		Acumulado [%]	
		[g]	[%]	Passado	Retido
38,1	1"1/2				
25,4	1"				
19,1	3/4"				
12,7	1/2"				
9,52	3/8"				
4,76	nº4				
2,38	nº8	0	0	100	0
1,19	nº16	0,6	0,1	99,9	0,1
0,595	nº30	677,9	67,8	32,1	67,9
0,297	nº50	61,5	6,2	26,0	74,0
0,149	nº100	152,1	15,2	10,7	89,3
0,075	nº200	106,4	10,6	0,1	99,9
	Refugo	1,1	0,1	0,0	-
	Total	999,6	100,0		
Módulo de finura			2,3		
Máxima dimensão do agregado (D)			1,19 mm		
Mínima dimensão do agregado (d)			0,075 mm		

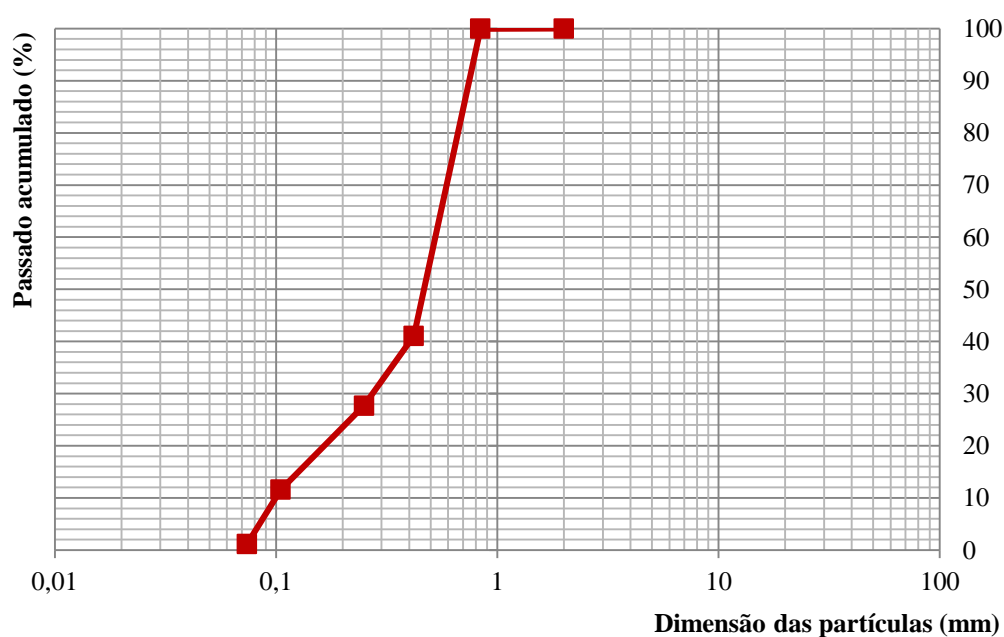


Figura I.8.1 - Curva granulométrica média do agregado fino normalizado

## Análise granulométrica dos agregados reciclados

Tabela I.2 - Resultados médios da curva do agregado fino reciclado do local 1 (base)

Malha [mm]	Peneiro	Retido		Acumulado [%]	
		[g]	[%]	Passado	Retido
38,1	1"1/2				
25,4	1"				
19,1	3/4"	0,0	0,0	100,0	0,0
12,7	1/2"	13,7	0,7	99,3	0,7
9,52	3/8"	134,3	6,8	92,5	7,5
4,76	nº4	304,9	15,4	77,1	22,9
2,38	nº8	342,3	17,3	59,8	40,2
1,19	nº16	76,1	3,9	55,9	44,1
0,595	nº30	618,2	31,3	24,6	75,4
0,297	nº50	225,6	12,9	11,7	88,3
0,149	nº100	113,2	5,7	6,0	94,0
0,075	nº200	78,2	4,0	2,0	98,0
	Refugo	39,7	2,0	0,0	-
	Total	1976,2	100,0		
Módulo de finura			3,7		
Máxima dimensão do agregado (D)			9,52 mm		
Mínima dimensão do agregado (d)			0,075 mm		

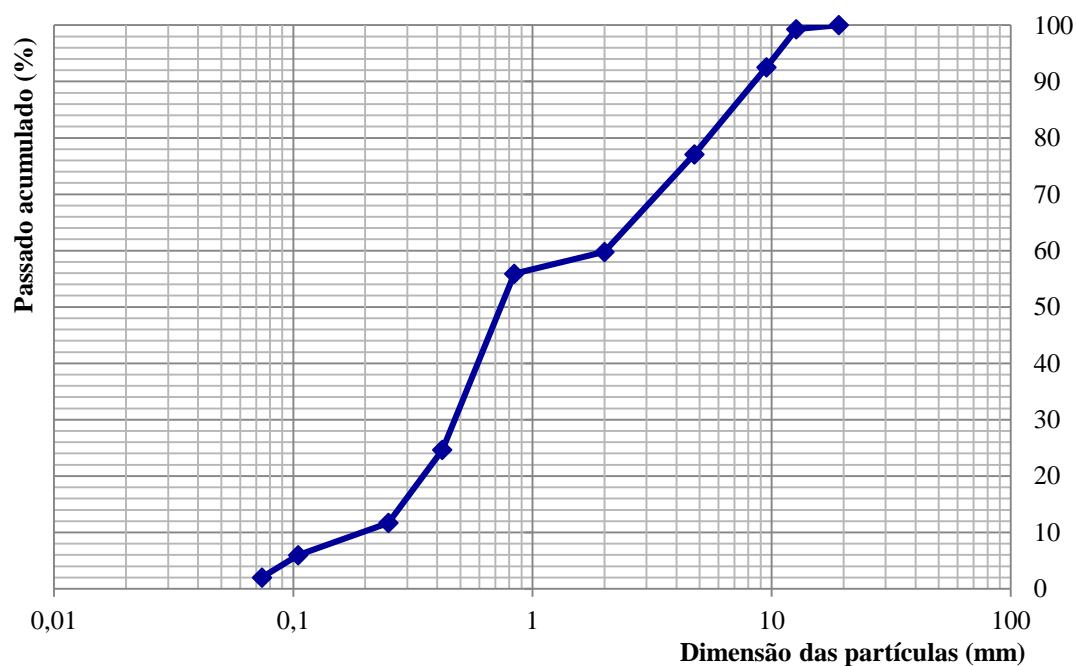


Figura I.8.2 - Curva granulométrica média do agregado fino reciclado do local 1 (base)

Tabela I.3 - Resultados médios da curva do agregado fino reciclado do local 2 (meio)

Malha [mm]	Peneiro	Retido		Acumulado [%]	
		[g]	[%]	Passado	Retido
38,1	1"1/2				
25,4	1"				
19,1	3/4"	0,0	0,0	100,0	0,0
12,7	1/2"	12,3	0,6	99,4	0,6
9,52	3/8"	90	4,5	94,9	5,1
4,76	nº4	267,5	13,4	81,5	18,5
2,38	nº8	348,8	17,4	64,1	35,9
1,19	nº16	82,2	4,1	60,0	40,0
0,595	nº30	708,3	35,4	24,5	75,5
0,297	nº50	271,6	13,6	11,0	89,0
0,149	nº100	117,1	5,9	5,1	94,9
0,075	nº200	62	3,1	2,0	98,0
	Refugo	40	2,0	0,0	-
	Total	1999,8	100,0		
Módulo de finura			3,6		
Máxima dimensão do agregado (D)			9,52 mm		
Mínima dimensão do agregado (d)			0,075 mm		

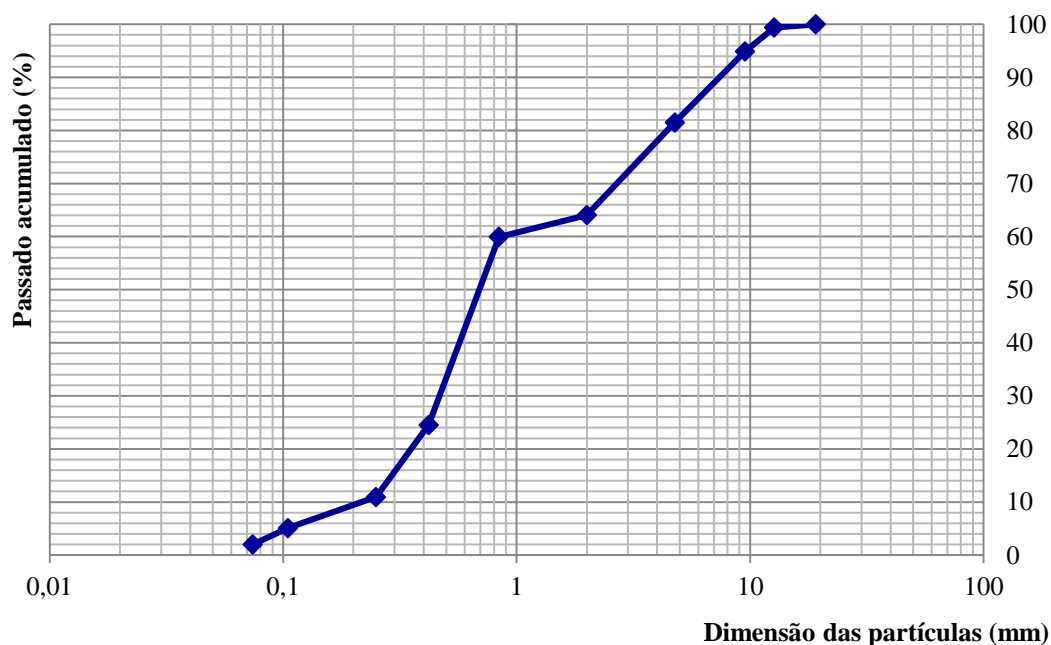


Figura I.8.3 - Curva granulométrica média do agregado fino reciclado do local 2 (meio)

Tabela I.4 - Resultados médios da curva do agregado fino reciclado do local 3 (topo)

Malha [mm]	Peneiro	Retido		Acumulado [%]	
		[g]	[%]	Passado	Retido
38,1	1"1/2				
25,4	1"				
19,1	3/4"	0,0	0,0	100,0	0,0
12,7	1/2"	18,8	0,9	99,1	0,9
9,52	3/8"	38,1	1,9	97,2	2,8
4,76	nº4	222,6	11,1	86,0	14,0
2,38	nº8	404,2	20,2	65,8	34,2
1,19	nº16	100,7	5,0	60,8	39,2
0,595	nº30	736,8	36,8	23,9	76,1
0,297	nº50	290,8	14,5	9,4	90,6
0,149	nº100	97	4,9	4,5	95,5
0,075	nº200	49,2	2,5	2,1	97,9
	Refugo	41,5	2,1	0,0	-
	Total	1999,7	100,0		
Módulo de finura			3,5		
Máxima dimensão do agregado (D)			9,52 mm		
Mínima dimensão do agregado (d)			0,149 mm		

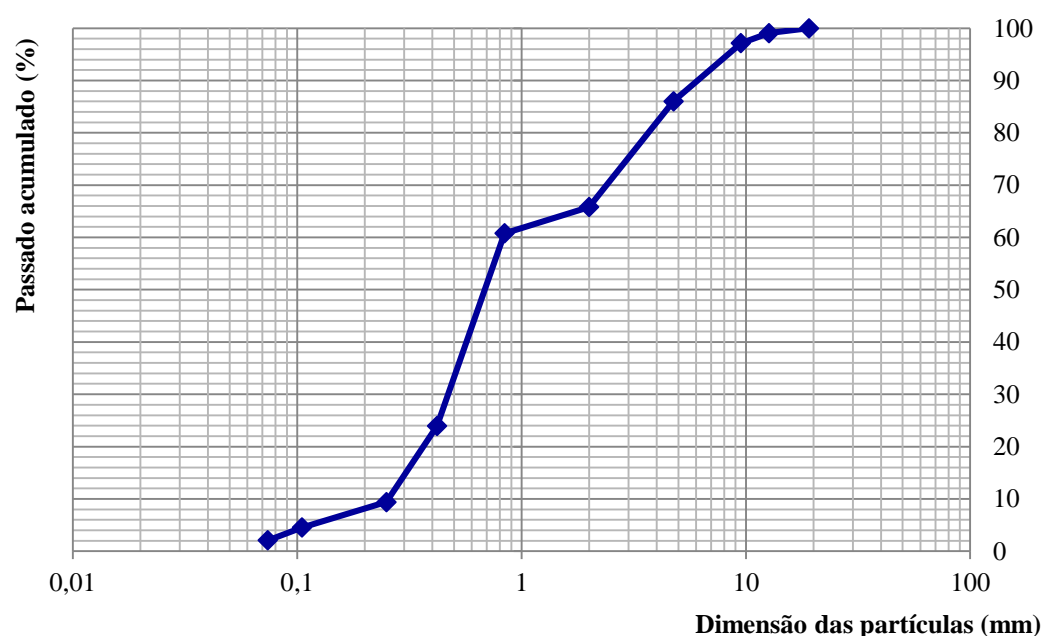


Figura I.8.4 - Curva granulométrica média do agregado fino reciclado do local 3 (topo)

Tabela I.5 - Resultados médios da curva do agregado fino reciclado remanescente

Malha [mm]	Peneiro	Retido		Acumulado [%]	
		[g]	[%]	Passado	Retido
38,1	1"1/2				
25,4	1"				
19,1	3/4"	0	0	100	0
12,7	1/2"	2,5	0,1	99,9	0,1
9,52	3/8"	16,7	0,8	99,0	1,0
4,76	nº4	97,8	4,9	94,1	5,9
2,38	nº8	381,2	19,1	75,0	25,0
1,19	nº16	125,2	6,3	68,8	31,2
0,595	nº30	1028,0	51,5	17,3	82,7
0,297	nº50	192,5	9,6	7,6	92,4
0,149	nº100	76,8	3,8	3,8	96,2
0,075	nº200	42,4	2,1	1,7	98,3
	Refugo	33	1,7	0,0	-
	Total	1996,1			
Módulo de finura			3,3		
Máxima dimensão do agregado (D)			9,52 mm		
Mínima dimensão do agregado (d)			0,075 mm		

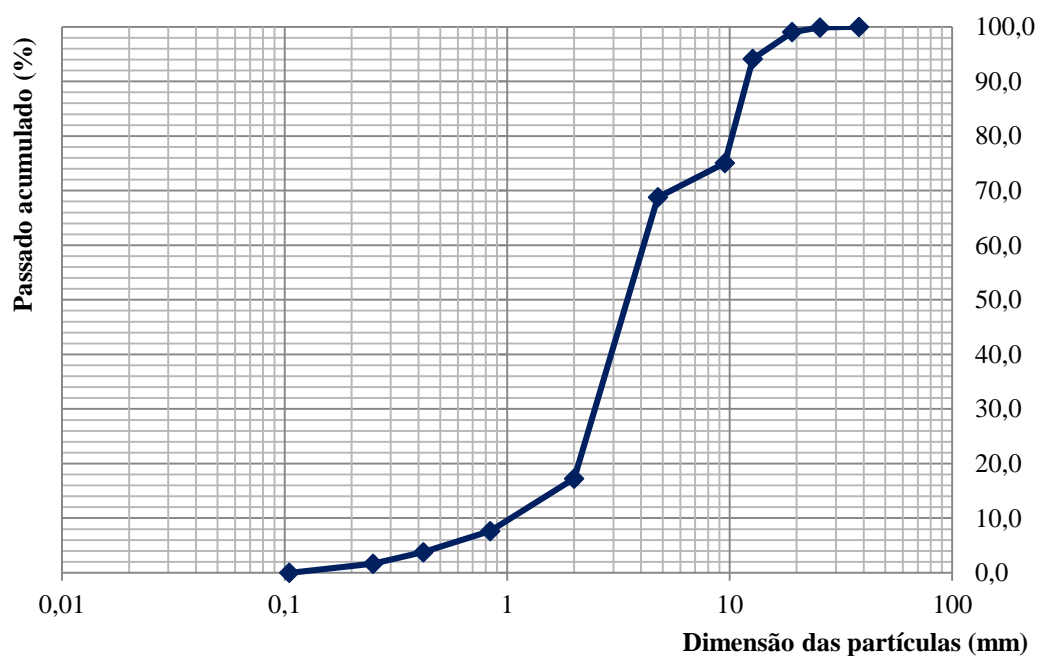


Figura I.8.5 - Curva granulométrica média do agregado fino reciclado remanescente

**Baridade dos agregados e ligantes**

Tabela I.6 – Valores de baridade de cada amostra de agregados, ligante e adições pozolânicas

Material	Amostra	Baridade da amostra [kg/m <sup>3</sup> ]	Média [kg/m <sup>3</sup> ]
Agregado fino normalizado	1	1578,13	1589,11
	2	1601,60	
	3	1587,60	
Agregado fino reciclado (fase 1)	1	977,73	1037,42
	2	1035,07	
	3	1029,87	
	4	1028,53	
	5	1110,93	
	6	1143,60	
	7	1135,33	
	8	932,40	
	9	943,33	
Agregado fino reciclado (fase 2)	1	981,07	1010,27
	2	987,33	
	3	1040,80	
	4	996,93	
	5	1036,13	
	6	1019,33	
Cinzas volantes conformes	1	1120,13	1118,84
	2	1116,00	
	3	1120,40	
Cinzas volantes não conformes	1	1045,33	1050,62
	2	1053,60	
	3	1052,93	
Cimento	1	1034,53	1032,89
	2	1021,47	
	3	1042,67	



## 2 – CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS FRESCAS

*Consistência por espalhamento*

Tabela I.7 – Valores obtidos no ensaio de consistência de todas as argamassas

Argamassa	Ensaio de consistência					Espalhamento [%]
	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>	d médio [mm]	
N	175	167	165	170	169,3	69,3
R	-	-	-	-	-	-
NVc	169	172	170	170	170,3	70,3
NVnc	175	176	175	174	175,0	75,0
RVc	-	-	-	-	-	-
RVnc	-	-	-	-	-	-
NRVc	150	150	160	157	154,3	54,3
NRVnc	170	167	167	169	168,3	68,3
R'r	170	169	167	165	167,8	67,8
R'	174	170	172	170	171,5	71,5

## 3 – CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS ENDURECIDAS

*Ensaio de módulo de elasticidade dinâmico*

Tabela I.8 – Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de cimento com agregado fino normalizado (N)

Argamassas	E <sub>din</sub> [MPa] (1ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa] (2ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa] (3ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa] (4ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa]	E <sub>din</sub> médio [MPa]	DP [MPa]
N_1	2348	2017	2966	3457	2697	2356	273
N_2	2392	2365	2380	2367	2376		
N_3	2371	2376	2400	2389	2384		
N_4	1642	1764	2015	2011	1858		
N_5	2339	2446	2349	2451	2396		
N_6	2418	2414	2426	2439	2424		

Tabela I.9 - Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de cimento com agregado fino reciclado (R)

Argamassas	E <sub>din</sub> [MPa] (1ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa] (2ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa] (3ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa] (4ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa]	E <sub>din</sub> médio [MPa]	DP [MPa]
R_1	2002	2016	1987	2020	2006	1857	145
R_2	1946	1938	1951	1956	1948		
R_3	1881	1895	1903	1890	1892		
R_4	1937	1952	1916	1927	1933		
R_5	1738	1760	1726	1741	1741		
R_6	1628	1578	1649	1636	1623		

Tabela I.10 - Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de cimento com agregado fino normalizado com adição de cinzas volantes conformes (NVc)

Argamassas	E <sub>din</sub> [MPa] (1ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa] (2ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa] (3ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa] (4ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa]	E <sub>din</sub> médio [MPa]	DP [MPa]
NVc_1	2411	2389	2409	2395	2401	2479	222
NVc_2	2570	2286	2350	2437	2411		
NVc_3	2424	2401	2390	2351	2392		
NVc_4	2310	2316	2361	2296	2321		
NVc_5	2967	2762	2868	2890	2872		
NVc_6	x	x	x	x	x		

x – Ensaio não obtido neste provete

Tabela I.11 - Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de cimento com agregado fino normalizado com adição de cinzas volantes não conformes (NVnc)

Argamassas	E <sub>din</sub> [MPa] (1ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa] (2ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa] (3ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa] (4ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa]	E <sub>din</sub> médio [MPa]	DP [MPa]
NVnc_1	2296	2284	2290	2311	2295	2468	95
NVnc_2	2425	2412	2503	2485	2456		
NVnc_3	2424	2431	2487	2503	2461		
NVnc_4	2531	2469	2471	2514	2496		
NVnc_5	2497	2506	2801	2481	2571		
NVnc_6	2530	2546	2517	2527	2530		

Tabela I.12 - Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas cimento com agregado fino reciclado com adição de cinzas volantes conformes (RVc)

Argamassas	E <sub>din</sub> [MPa] (1ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa] (2ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa] (3ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa] (4ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa]	E <sub>din</sub> médio [MPa]	DP [MPa]
RVc_1	1577	1603	1580	1621	1595	1823	145
RVc_2	1720	1728	1692	1699	1710		
RVc_3	1850	2023	1901	1935	1927		
RVc_4	1839	1901	1875	1796	1853		
RVc_5	1841	1854	1900	1871	1867		
RVc_6	1962	1981	2007	1990			

Tabela I.13 - Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de cimento com agregado fino reciclado com adição de cinzas volantes não conformes (RVnc)

Argamassas	E <sub>din</sub> [MPa] (1ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa] (2ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa] (3ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa] (4ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa]	E <sub>din</sub> médio [MPa]	DP [MPa]
RVnc_1	8028	8042	8028	8053	8038	8039	113
RVnc_2	7807	8080	7786	7898	7893		
RVnc_3	8182	8201	8097	8169	8162		
RVnc_4	8163	8239	8130	8185	8179		
RVnc_5	7803	7945	8047	8028	7956		
RVnc_6	7994	8037	7980	8008	8005		

Tabela I.14 - Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de cimento com agregado fino normalizado e reciclado com adição de cinzas volantes conformes (NRVc)

Argamassas	E <sub>din</sub> [MPa] (1ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa] (2ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa] (3ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa] (4ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa]	E <sub>din</sub> médio [MPa]	DP [MPa]
NRVnc_1	x	x	x	x	x	2054	21
NRVnc_2	2012	2023	1987	2103	2031		
NRVnc_3	2109	1968	2190	1959	2057		
NRVnc_4	2073	2085	2069	2104	2083		
NRVnc_5	2072	2081	2049	2059	2065		
NRVnc_6	1956	2069	2036	2083	2036		

x – Ensaio não obtido neste provete

Tabela I.15 - Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de cimento com agregado fino normalizado e reciclado com adição de cinzas volantes não conformes (NRVnc)

Argamassas	E <sub>din</sub> [MPa] (1ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa] (2ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa] (3ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa] (4ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa]	E <sub>din</sub> médio [MPa]	DP [MPa]
NRVnc_1	7932	7893	7936	7649	7928	8580	469
NRVnc_2	8785	8807	8578	8731	8725		
NRVnc_3	8625	8634	8611	8637	8627		
NRVnc_4	9022	8983	9014	9141	9040		

Tabela I.16 - Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de cimento com agregado fino reciclado da fase 2 e retardador de presa (R'r)

Argamassas	E <sub>din</sub> [MPa] (1ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa] (2ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa] (3ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa] (4ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa]	E <sub>din</sub> médio [MPa]	DP [MPa]
R'r_1	7847	7851	7903	7851	7863	7897	227
R'r_2	7593	7608	7620	7642	7616		
R'r_3	7626	7632	7701	7689	7662		
R'r_4	8145	8029	8003	8038	8054		
R'r_5	8187	8200	8206	8191	8196		
R'r_6	7970	7992	8004	7997	7991		

Tabela I.17 - Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de cimento com agregado fino reciclado da fase 2 (R)

Argamassas	E <sub>din</sub> [MPa] (1ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa] (2ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa] (3ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa] (4ª leitura)	E <sub>din</sub> [MPa]	E <sub>din</sub> méd [MPa]	DP [MPa]
R'_1	8530	8544	8526	8532	8533	8509	61
R'_2	8423	8571	8586	8489	8517		
R'_3	8442	8507	8511	8503	8491		
R'_4	8482	8399	8419	8380	8420		
R'_5	8611	8559	8643	8609	8606		
R'_6	8453	8475	8501	8518	8487		

Tabela I.18 - Resultados do ensaio de resistência à tração por flexão e resistência à compressão das argamassas

Provetes	Massa (g)	Resistência à tração por flexão				Resistência à compressão			
		Ft(N)	Rt (MPa)	Rt médio [MPa]	DP	Fc (N)	Rc (MPa)	Rc médio [MPa]	DP
N_1	524,152	1425,47	3,34	3,01	0,3	28572,70	17,86	15,66	2,4
N_2	525,191	1147,95	2,69			25591,62	15,99		
N_3	526,153	1282,39	3,01			20981,69	13,11		
R_1	465,198	1135,42	2,66	2,68	0,1	17620,53	11,01	10,83	0,6
R_2	457,623	1096,28	2,57			16229,69	10,14		
R_3	465,079	1200,12	2,81			18110,52	11,32		
NVc_1	534,501	1343,22	3,15	3,40	0,4	19688,18	12,31	12,16	0,7
NVc_2	532,743	1622,36	3,80			20409,47	12,76		
NVc_3	532,021	1386,11	3,25			18261,55	11,41		
NVnc_1	525,096	1076,20	2,52	1,96	0,1	18981,44	11,86	11,75	0,9
NVnc_2	530,651	1105,93	2,59			20202,79	12,63		
NVnc_3	545,042	1170,05	2,74			17201,85	10,75		
RVc_1	447,093	1022,98	2,40	2,28	0,1	11903,92	7,44	8,81	1,2
RVc_2	447,214	938,80	2,20			14768,09	9,23		
RVc_3	453,296	961,57	2,25			15613,00	9,76		
RVnc_1	445,633	944,71	2,21	2,24	0,1	7526,12*	4,70*	8,27	2,1
RVnc_2	458,159	1001,10	2,35			13723,50	8,58		
RVnc_3	448,572	918,78	2,15			12726,45	7,95		
NRVc_1	478,577	1283,10	3,01	2,75	0,3	17030,13	10,64	8,73	2,2
NRVc_2	493,791	1203,27	2,82			10228,65	6,39		
NRVc_3	494,241	1029,48	2,41			14625,46	9,14		
NRVnc_1	467,041	695,95	1,63	1,62	0,0	8935,14	5,58	6,15	0,8
NRVnc_2	488,657	689,21	1,62			10757,80	6,72		
R'r_1	448,728	996,51	2,34	2,37	0,0	9317,17	5,82	5,67	0,8
R'r_2	444,148	1027,72	2,41			10238,33	6,40		
R'r_3	444,693	1004,8	2,36			7658,67	4,79		
R'_1	451,151	1166,33	2,73	2,57	0,2	11854,58	7,41	9,15	1,5
R'_2	452,011	1087,59	2,55			16486,16	10,30		
R'_3	453,135	1036	2,43			15558,83	9,72		

\*Comparativamente com os restantes, este valor não foi considerado

**Absorção de água por capilaridade**

Tabela I.19 - Registos das massas durante o ensaio de absorção de água por capilaridade das argamassas (“meios” provetes)

Provetes	Massa do provete [g]								
	0 min	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min	120 min	180 min	360 min
N_1	249,43	252,870	254,07	255,16	257,58	261,16	264,73	267,80	268,14
N_2	250,61	254,040	255,15	256,01	258,05	261,21	264,63	267,47	268,43
N_3	226,52	230,300	231,56	232,44	234,38	237,59	240,33	242,53	242,73
R_1	219,74	223,63	224,62	225,37	227,29	229,89	233,05	236,21	242,20
R_2	220,01	223,44	224,78	225,64	227,81	230,45	233,96	236,86	242,99
R_3	224,57	228,26	229,64	230,48	232,56	235,01	238,18	240,93	246,68
NVc_1	282,05	286,12	287,55	288,64	291,12	295,05	299,53	303,01	303,6
NVc_2	243,15	248,19	250,11	251,57	254,86	259,55	261,37	261,56	261,71
NVc_3	254,99	260,39	262,40	263,92	267,38	272,16	274,20	274,52	274,71
NVnc_1	238,09	242,42	243,99	245,36	248,21	252,35	255,16	256,76	257,98
NVnc_2	251,69	256,05	257,98	259,36	262,41	267,36	270,70	272,55	272,86
NVnc_3	262,37	267,19	269,43	271,03	274,72	279,65	284,12	286,56	286,84
RVc_1	218,71	222,89	224,25	225,36	227,46	231,39	235,23	237,77	244,58
RVc_2	205,79	209,87	211,18	212,25	214,45	218,41	222,32	224,83	231,56
RVc_3	222,42	226,43	227,74	228,68	231,01	235,23	239,13	241,82	248,96
RVnc_1	222,36	226,05	227,21	228,22	230,25	233,84	236,68	239,46	245,38
RVnc_2	210,03	215,17	216,35	217,29	219,31	222,91	225,85	228,63	234,63
RVnc_3	225,13	227,75	228,95	229,72	231,63	235,11	237,77	240,35	245,97
NRVc_1	241,63	244,97	246,09	246,96	248,87	252,42	255,16	257,88	263,57
NRVc_2	234,72	238,81	240,02	240,97	243,03	246,88	249,85	252,78	258,19
NRVc_3	238,93	242,28	243,47	244,37	246,31	249,87	252,83	255,63	261,66
NRVnc_1	220,55	225,41	227,14	228,37	231,09	236,12	239,93	243,67	247,51
NRVnc_2	245,89	250,59	252,08	253,22	255,72	260,19	263,78	267,21	274,25
R'r_1	240,13	244,63	246,11	247,25	249,97	253,68	258,89	262,67	271,07
R'r_2	210,59	214,85	216,46	217,68	220,31	224,27	229,07	233,01	241,17
R'r_3	227,19	231,86	233,29	234,46	237,13	240,84	245,97	249,79	258,28
R'_1	205,47	209,29	210,42	211,48	213,44	216,36	220,59	223,74	230,37
R'_2	216,71	221,47	222,66	223,62	225,85	228,98	233,18	236,26	242,87
R'_3	245,33	249,11	250,31	251,19	253,17	255,86	259,54	262,31	268,14

Tabela I.19 - Registos das massas durante o ensaio de absorção de água por capilaridade das argamassas (continuação)

Provetes	Massa do provete [g]				
	1 d	2 d	3 d	4 d	5 d
N_1	268,63	268,69	268,85	268,97	269,08
N_2	268,75	268,97	269,08	269,25	269,26
N_3	243,08	243,27	243,40	243,54	243,61
R_1	251,79	252,31	252,59	252,64	252,66
R_2	251,98	252,40	252,60	252,74	252,78
R_3	256,60	257,06	257,16	257,50	257,52
NVc_1	304,20	304,47	304,48	304,57	304,79
NVc_2	261,97	262,49	262,82	263,02	263,22
NVc_3	274,93	275,19	275,56	275,98	276,24
NVnc_1	258,44	258,66	258,75	258,83	259,07
NVnc_2	273,38	273,53	273,69	273,87	273,99
NVnc_3	287,37	287,64	287,91	288,07	288,20
RVc_1	250,94	251,29	251,74	251,79	251,81
RVc_2	236,89	237,31	237,75	237,76	237,95
RVc_3	254,83	255,37	255,73	255,85	255,93
RVnc_1	256,35	256,90	257,35	257,41	257,43
RVnc_2	241,84	242,24	242,65	242,71	242,83
RVnc_3	257,92	258,48	258,96	259,13	259,15
NRVc_1	266,82	267,11	267,36	267,53	267,63
NRVc_2	259,31	259,65	259,76	259,86	260,04
NRVc_3	263,89	264,21	264,39	264,55	264,99
NRVnc_1	248,34	248,36	248,90	249,38	249,42
NRVnc_2	275,88	276,36	276,56	276,93	277,11
R'r_1	275,36	278,03	278,33	278,65	278,76
R'r_2	244,10	244,65	244,91	244,12	245,35
R'r_3	262,22	262,89	263,24	263,47	263,53
R'_1	237,73	239,25	238,35	238,54	238,70
R'_2	250,64	251,29	251,57	251,70	251,89
R'_3	282,01	283,06	283,48	283,60	283,82

Tabela I.20 - Registos das massas durante o ensaio de absorção de água por capilaridade das argamassas (provetes inteiros)

Provetes	Massa do provete [g]								
	0 min	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min	120 min	180 min	360 min
N_4	525,26	528,68	529,73	530,59	532,43	535,13	538,81	541,81	547,05
N_5	518,88	522,96	524,31	525,29	527,43	530,54	534,59	537,53	543,95
N_6	523,66	527,56	529,13	530,17	532,56	536,00	540,47	543,97	551,48
R_4	457,55	461,89	463,24	464,38	466,73	470,01	473,99	477,03	484,40
R_5	463,48	467,77	469,08	470,14	472,51	475,93	479,94	483,38	490,47
R_6	462,67	466,94	468,22	469,27	471,55	474,89	479,27	483,12	489,91
NVc_4	535,82	539,99	541,49	542,65	545,14	548,89	554,95	558,48	566,25
NVc_5	524,96	530,05	531,87	533,29	536,44	540,76	546,88	551,16	559,51
NVc_6	524,73	528,60	530,07	531,16	533,69	537,41	542,78	546,21	554,26
NVnc_4	525,23	530,31	532,30	533,69	536,12	541,38	547,39	551,26	560,01
NVnc_5	531,25	535,54	537,25	538,49	541,37	545,68	552,24	555,85	564,90
NVnc_6	514,60	518,97	520,57	521,86	524,86	529,12	535,55	539,35	548,32
RVc_4	445,55	449,56	450,86	451,87	454,08	457,15	460,95	464,25	471,13
RVc_5	453,26	457,52	458,89	459,92	462,25	465,58	469,65	473,16	480,57
RVc_6	445,13	449,39	450,78	451,84	454,21	457,43	461,33	464,79	471,95
RVnc_4	451,35	455,44	456,55	457,46	459,49	462,37	466,20	468,87	475,24
RVnc_5	457,64	462,45	463,68	464,66	466,76	469,71	473,57	476,29	482,64
RVnc_6	454,02	458,64	459,97	460,99	463,21	466,14	470,15	472,97	479,72
NRVc_4	481,47	485,35	486,43	487,32	489,16	491,88	495,67	498,32	504,83
NRVc_5	481,67	486,26	487,57	488,54	490,65	493,54	497,31	499,91	505,96
NRVc_6	493,55	497,86	498,19	499,06	500,95	503,68	507,40	510,02	516,26
NRVnc_3	481,01	486,21	487,74	488,09	491,37	494,78	499,45	502,69	510,18
NRVnc_4	482,14	487,27	488,86	490,04	492,62	496,11	500,98	504,32	512,29
R'r_4	432,32	437,32	438,82	440,09	442,92	446,80	452,35	456,29	465,06
R'r_5	435,14	439,90	441,14	442,31	444,94	448,65	453,91	457,73	466,22
R'r_6	435,23	439,68	441,38	442,58	445,18	448,83	454,08	457,92	466,43
R'_4	454,32	458,89	460,43	461,59	463,84	467,19	471,72	475,15	482,61
R'_5	450,21	454,34	455,84	456,91	459,29	462,71	467,28	470,64	477,84
R'_6	454,82	458,58	459,94	460,91	463,06	466,11	470,54	473,68	480,85



Tabela I.20 – Registos das massas durante o ensaio de absorção de água por capilaridade das argamassas (continuação)

Provetes	Massa do provete [g]				
	1 d	2 d	3 d	4 d	5 d
N_4	560,71	561,74	561,83	562,24	562,31
N_5	557,86	558,48	558,65	558,96	559,21
N_6	563,67	564,03	564,18	564,54	564,66
R_4	503,71	514,78	520,44	522,14	522,53
R_5	509,30	520,68	526,59	528,15	528,50
R_6	509,43	521,18	527,16	528,76	529,10
NVc_4	579,09	579,63	579,80	580,09	580,34
NVc_5	569,66	569,99	570,45	570,83	571,03
NVc_6	568,82	569,02	569,69	570,09	570,23
NVnc_4	573,82	574,10	574,89	575,40	575,67
NVnc_5	579,70	580,12	580,79	581,39	581,65
NVnc_6	560,88	561,01	561,77	562,41	562,47
RVc_4	488,63	500,81	507,67	511,43	512,92
RVc_5	499,64	512,45	519,34	521,79	522,57
RVc_6	490,19	502,73	509,56	511,97	512,96
RVnc_4	492,28	505,42	512,52	517,48	519,53
RVnc_5	500,24	512,58	519,85	524,62	526,61
RVnc_6	496,44	509,05	516,39	520,87	522,69
NRVc_4	520,81	528,24	533,04	534,24	534,51
NRVc_5	521,55	529,24	532,82	534,13	534,43
NRVc_6	531,77	539,41	542,87	543,74	543,96
NRVnc_3	529,28	536,54	539,38	540,32	540,68
NRVnc_4	531,87	538,74	541,14	542,15	542,39
R'r_4	491,83	500,46	501,76	502,31	502,45
R'r_5	492,57	503,70	505,03	505,51	505,81
R'r_6	492,25	503,50	504,79	505,16	505,46
R'_4	503,42	515,66	521,73	523,97	524,99
R'_5	498,25	510,23	516,30	518,74	519,65
R'_6	501,16	513,39	519,84	521,75	523,99

**Secagem**

Tabela I.21 - Registos das massas durante o ensaio de secagem das argamassas (“meios” provetes)

Provetes	Massa do provete [g]								
	0 min	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min	120 min	180 min	360 min
N_1	269,08	268,78	268,66	268,52	268,14	267,48	265,52	265,35	263,04
N_2	269,33	268,99	268,88	268,74	268,34	267,68	266,66	265,74	263,08
N_3	243,76	243,48	243,34	243,23	242,92	242,36	241,46	240,75	238,7
R_1	252,86	252,55	252,36	252,24	251,83	251,14	250,07	249,12	246,26
R_2	253,01	252,75	252,59	252,43	252,04	251,40	250,46	249,69	247,31
R_3	257,73	257,45	257,28	257,14	256,75	256,13	255,25	254,55	252,3
NVc_1	304,87	304,57	304,49	304,31	303,90	303,29	302,14	300,94	297,54
NVc_2	279,49	279,24	279,10	278,94	278,59	278,13	277,30	276,40	273,84
NVc_3	311,97	311,55	311,41	311,25	310,87	310,38	309,48	308,53	305,82
NVnc_1	259,17	258,84	258,69	258,52	258,12	257,57	256,55	255,55	252,72
NVnc_2	274,03	273,65	273,49	273,34	272,97	272,50	271,69	270,89	268,6
NVnc_3	288,29	287,98	287,83	287,69	287,34	286,88	286,13	285,33	283,07
RVc_1	252,08	251,65	251,47	251,39	250,73	250,46	249,37	248,38	245,56
RVc_2	237,93	237,58	237,44	237,35	237,15	236,65	235,91	235,23	233,4
RVc_3	256,19	255,63	255,58	255,49	255,27	254,82	254,12	253,45	251,62
RVnc_1	257,60	257,19	257,08	256,90	256,54	255,85	254,63	253,67	250,89
RVnc_2	243,01	242,50	242,42	242,25	241,96	241,41	240,54	239,82	237,8
RVnc_3	259,29	259,02	258,85	258,73	258,51	257,99	257,18	256,54	254,63
NRVc_1	267,61	267,26	267,07	266,90	266,54	265,95	264,99	263,91	261,56
NRVc_2	260,06	259,69	259,50	259,37	259,07	258,58	257,93	257,13	255,23
NRVc_3	264,59	264,28	264,12	264,00	263,75	263,37	262,72	261,99	260,26
NRVnc_1	249,62	249,32	249,15	248,98	248,61	247,98	246,85	245,64	242,44
NRVnc_2	277,23	277,01	275,86	275,69	275,33	274,80	273,91	272,91	270,14
R'r_1	278,82	278,44	278,23	278,08	277,84	277,29	275,94	274,89	271,73
R'r_2	245,35	244,10	244,92	244,79	244,61	244,18	243,03	242,21	239,681
R'r_3	263,62	263,33	263,21	263,08	262,90	262,40	261,28	260,32	257,544
R'_1	238,74	238,45	238,27	238,14	237,94	237,41	236,35	235,48	232,672
R'_2	252,10	251,67	251,48	251,33	251,09	250,53	249,28	248,23	245,358
R'_3	283,85	283,49	283,25	283,10	282,84	282,16	280,57	279,21	275,35

Tabela I.21 - Registos das massas durante o ensaio de secagem das argamassas (continuação)

Provetes	Massa do provete [g]							
	1 d	2 d	3 d	4 d	5 d	6 d	7 d	8d
N_1	258,93	257,05	256,16	255,64	255,27	255,03	254,83	254,71
N_2	258,59	256,743	255,84	255,32	254,96	254,734	254,54	254,42
N_3	234,05	232,28	231,41	230,9	230,57	230,35	230,17	230,07
R_1	236,42	231,61	229,12	227,62	226,67	226,04	225,56	225,28
R_2	238,24	233,73	231,13	229,38	228,22	227,41	226,82	226,45
R_3	242,47	236,68	234,09	232,59	231,66	231,02	230,54	230,25
NVc_1	292,16	289,84	288,65	287,92	287,39	287,02	286,71	286,51
NVc_2	268,94	266,58	265,39	264,68	264,21	263,86	263,59	263,42
NVc_3	298,93	296,82	295,59	294,89	294,41	294,05	293,78	293,59
NVnc_1	245,99	243,93	242,91	242,31	241,93	241,67	241,48	241,38
NVnc_2	260,55	258,11	256,94	256,26	255,813	255,51	255,29	255,17
NVnc_3	274,13	271,02	269,55	268,68	268,13	267,75	267,48	267,32
RVc_1	235,99	230,22	227,74	226,32	225,386	224,76	224,28	224,00
RVc_2	221,84	217,55	215,41	214,02	213,11	212,47	211,98	211,70
RVc_3	239,66	234,55	232,18	230,69	229,69	229,02	228,53	228,23
RVnc_1	242,44	236,81	234,04	232,36	230,88	230,54	229,98	229,65
RVnc_2	229,04	223,06	220,226	218,51	217,41	216,66	216,09	215,75
RVnc_3	244,37	238,41	235,68	234,12	233,09	232,39	231,87	231,54
NRVc_1	255,03	251,91	250,13	249,01	248,29	247,8	247,43	247,22
NRVc_2	248,66	245,49	243,74	242,51	241,65	241,03	240,58	240,32
NRVc_3	253,69	250,13	248,37	247,13	246,24	245,61	245,13	244,83
NRVnc_1	236,57	232,33	230,03	228,45	227,35	226,56	226,04	225,74
NRVnc_2	262,66	258,06	255,39	253,57	252,38	251,60	251,07	250,79
R'r_1	259,38	254,82	252,47	250,89	249,81	249,03	248,48	248,31
R'r_2	227,99	223,542	221,34	219,90	218,95	218,30	217,83	217,23
R'r_3	245,51	241,00	238,66	237,11	236,10	235,37	234,85	234,65
R'_1	222,49	218,09	215,87	214,58	213,79	213,27	212,92	212,05
R'_2	234,66	230,05	227,72	226,29	225,41	224,86	224,49	223,98
R'_3	264,78	260,12	257,66	256,18	255,23	254,60	254,18	253,99

Tabela I.22 - Registos das massas durante o ensaio de secagem das argamassas (provetes inteiros)

Provetes	Massa do provete [g]								
	0 min	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min	120 min	180 min	360 min
N_4	562,23	561,77	561,48	561,20	560,50	559,28	557,27	555,51	550,53
N_5	559,22	558,79	558,48	558,25	557,57	556,37	554,68	553,20	548,93
N_6	564,66	564,16	563,86	563,59	562,88	561,69	559,75	557,94	553,06
R_4	522,53	522,07	521,73	521,43	520,68	519,46	517,43	515,67	510,62
R_5	528,50	528,10	527,78	527,49	526,76	525,61	523,88	522,39	518,14
R_6	529,10	528,64	528,32	528,02	527,27	526,09	524,18	522,39	517,52
NVc_4	571,03	570,52	570,24	569,99	569,29	568,29	566,52	564,55	559,10
NVc_5	580,34	579,85	579,57	579,31	578,63	577,70	576,15	574,54	570,16
NVc_6	570,23	569,70	569,41	569,17	568,48	567,45	565,58	563,67	558,46
NVnc_4	575,67	575,15	574,84	574,56	573,85	572,85	570,95	569,06	563,73
NVnc_5	581,65	581,28	580,98	580,72	580,05	579,13	577,59	576,10	571,89
NVnc_6	562,48	562,03	561,74	561,48	560,80	559,75	557,98	556,20	550,94
RVc_4	512,92	512,40	512,11	511,87	511,26	510,33	508,77	507,42	503,29
RVc_5	522,57	522,04	521,77	521,52	520,99	520,21	518,82	517,63	514,26
RVc_6	512,96	512,39	512,10	511,85	511,25	510,32	508,50	506,76	502,04
RVnc_4	519,54	519,02	518,75	518,48	517,84	516,95	515,26	513,78	509,64
RVnc_5	526,61	526,00	525,76	525,49	524,85	524,04	522,52	521,20	517,27
RVnc_6	522,69	522,15	521,83	521,57	520,96	517,81	517,80	516,16	511,34
NRVc_4	534,51	533,98	533,66	533,41	532,89	532,01	530,68	529,19	525,41
NRVc_5	534,44	533,71	533,41	533,17	532,65	531,91	530,68	529,42	526,32
NRVc_6	543,96	543,48	543,16	542,87	542,33	541,37	539,45	537,57	533,88
NRVnc_3	540,68	540,22	539,89	539,58	538,92	538,04	536,05	533,92	528,18
NRVnc_4	542,39	541,97	541,70	541,44	540,88	540,02	538,52	536,67	531,73
R'r_4	502,51	502,07	501,69	501,38	500,96	499,82	497,19	494,98	488,67
R'r_5	505,97	505,43	505,05	504,80	504,36	502,23	500,61	498,52	491,96
R'r_6	505,65	505,71	504,82	504,57	504,14	503,03	500,65	498,72	492,78
R'_4	525,53	524,74	524,33	524,06	523,60	522,39	519,71	517,49	510,67
R'_5	520,22	519,53	519,09	518,81	518,33	517,12	514,38	512,00	504,88
R'_6	524,43	523,75	523,34	523,06	522,57	521,26	518,38	515,92	508,76

Tabela I.23 - Registos das massas durante o ensaio de secagem das argamassas (continuação)

Provetes	Massa do provete [g]							
	1 d	2 d	3 d	4 d	5 d	6 d	7 d	8d
N_4	540,76	536,87	534,94	533,76	532,95	532,38	532,24	531,69
N_5	538,65	534,57	532,54	531,29	530,46	529,86	529,39	529,09
N_6	542,88	539,03	537,05	535,79	534,66	534,37	533,89	533,59
R_4	491,42	482,03	476,69	473,22	470,89	469,30	468,06	467,31
R_5	497,72	488,55	483,29	479,73	477,35	475,67	474,39	473,59
R_6	499,42	489,49	483,79	479,99	477,44	475,65	474,26	473,29
NVc_4	547,14	542,57	540,26	538,83	537,85	537,15	536,60	536,25
NVc_5	557,41	553,17	550,95	549,56	548,62	547,93	547,37	547,01
NVc_6	545,67	542,57	539,37	537,97	536,99	536,26	535,69	535,30
NVnc_4	547,37	541,92	539,30	537,70	536,67	535,94	535,40	535,09
NVnc_5	553,24	548,18	545,58	543,98	542,95	535,93	535,40	535,09
NVnc_6	533,98	529,42	527,13	525,73	524,83	524,22	523,75	523,49
RVc_4	482,08	472,49	467,73	464,69	462,70	461,32	460,24	459,58
RVc_5	490,78	480,94	476,04	472,95	470,89	469,48	468,36	467,67
RVc_6	481,97	471,79	467,02	464,10	462,05	460,69	459,65	458,99
RVnc_4	487,94	477,72	473,14	470,39	468,61	467,36	466,39	465,82
RVnc_5	492,73	482,80	478,22	475,47	473,68	472,47	471,56	470,00
RVnc_6	489,40	479,58	474,84	471,94	470,05	468,78	467,81	467,23
NRVc_4	510,03	503,38	499,80	497,51	496,03	495,05	494,30	493,84
NRVc_5	510,86	504,17	500,45	498,03	496,47	495,46	494,68	494,02
NRVc_6	520,11	513,22	509,62	507,30	505,75	504,68	503,83	503,35
NRVnc_3	511,07	504,13	500,85	496,26	494,16	492,81	491,87	491,36
NRVnc_4	512,77	505,48	499,36	497,64	495,44	494,02	493,01	492,46
R'r_4	466,32	458,07	453,78	450,91	448,01	447,63	446,68	446,01
R'r_5	468,25	459,84	455,61	452,88	451,07	449,82	448,93	448,52
R'r_6	469,27	460,64	456,26	453,45	451,56	450,26	449,34	448,95
R'_4	490,51	481,89	477,29	474,42	472,57	471,35	470,52	470,02
R'_5	485,61	477,30	472,94	470,16	468,34	467,13	466,30	465,79
R'_6	489,40	481,35	477,08	474,43	472,69	471,56	470,79	470,10

**Massa volúmica real, aparente e porosidade aberta**

Tabela I.24 - Massa volúmica real, massa volúmica aparente e porosidade aberta das argamassas estudadas

Argamassas	m <sub>1</sub> [g]	m <sub>2</sub> [g]	m <sub>3</sub> [g]	MVR [kg/m <sup>3</sup> ]			MVA [kg/m <sup>3</sup> ]			PA [%]		
				MVR	Média	DP	MVA	Média	DP	PA	Média	DP
N_1	85,108	50,142	91,925	2434,02			2036,90			16,32		
N_2	69,770	41,043	75,448	2428,73	2421,19	17,84	2027,90	2026,09	11,82	16,50	16,32	0,18
N_3	88,331	51,539	95,409	2400,82			2013,47			16,13		
R_1	70,195	41,192	81,392	2420,27			1749,14			27,85		
R_2	69,867	41,037	81,082	2423,41	2417,96	6,90	1744,71	1738,63	11,81	28,01	28,10	0,30
R_3	68,052	39,817	79,194	2410,20			1725,02			28,43		
NVc_1	65,433	38,928	70,983	2468,70			2014,27			17,31		
NVc_2	77,090	46,647	85,396	2468,46	2429,55	67,60	2054,42	2073,69	45,24	16,77	17,04	4,30
NVc_3	46,108	26,500	48,194	2351,49			2125,38			9,62*		
NVnc_1	89,618	53,109	97,439	2454,68			2021,61			17,64		
NVnc_2	78,457	46,647	85,396	2466,43	2452,68	14,84	2024,75	2005,78	30,17	17,91	18,22	0,79
NVnc_3	77,385	45,630	84,453	2436,94			1970,99			19,12		
RVc_1	50,075	28,973	58,809	2373,00			1678,34			29,27		
RVc_2	68,725	39,911	79,673	2385,13	2346,54	56,65	1728,41	1733,36	57,65	27,53	26,07	4,14
RVc_3	70,090	39,369	78,453	2281,50			1793,32			21,40		
RVnc_1	63,649	37,035	74,383	2391,56			1704,21			28,74		
RVnc_2	65,339	37,878	76,275	2379,34	2381,64	8,99	1701,67	1702,54	1,45	28,48	28,51	0,21
RVnc_3	66,012	38,206	76,997	2374,02			1701,73			28,32		
NRVc_1	73,755	44,844	83,566	2551,11			1904,73			25,34		
NRVc_2	72,656	43,586	82,207	2499,35	2498,64	52,82	1881,26	1903,56	21,75	24,73	23,79	2,18
NRVc_3	70,065	41,414	77,817	2445,46			1924,70			21,30		
NRVnc_1	68,970	38,997	78,460	2301,07	2307,58	9,21	1747,71	1806,19	82,71	24,98	21,73	3,27
NRVnc_2	74,891	42,528	82,691	2314,09			1864,68			19,42		
R'r_1	59,020	33,483	68,456	2311,16			1687,59			26,98		
R'r_2	72,448	41,675	84,666	2354,27	2342,16	27,07	1685,19	1696,06	11,61	28,42	27,71	0,72
R'r_3	70,107	40,414	81,499	2361,06			1706,39			27,73		
R'_1	60,804	35,204	71,045	2375,16			1696,49			28,57		
R'_2	67,049	38,472	77,921	2346,26	2379,47	35,56	1699,64	1704,93	12,00	27,56	28,34	0,70
R'_3	43,020	25,221	50,252	2416,99			1718,67			28,89		

\*Comparativamente com os restantes, este valor não foi considerado

**Anexo II**

**FICHA TÉCNICA DO ADJUVANTE**







# Centrament Retard 350

## Retardador para betão

### Propriedades

- Livre de agentes promotores de corrosão
- Plastificante
- Reduz juntas de trabalho
- Permite vibração tardia e revibração
- Melhora as propriedades do betão endurecido:
  - Betão mais homogéneo nas estruturas
  - Alta resistência à tracção e à compressão
  - Aumenta a impermeabilidade à água
  - Diminui a retracção e a contracção
  - Aumenta a resistência contra elementos agressivos

### Áreas de aplicação

- Betão Pronto
- Betão fresco
- Betão em massa
- Betão impermeável

### Aplicação

O Centrament Retard 350 é um retardador com um bom efeito plastificante, livre de cloretos e outros agentes agressivos ao aço.

Centrament Retard 350 tem os seguintes efeitos no betão em fresco:

Melhora a trabalhabilidade no período necessário para a realização dos trabalhos.

Reduz juntas de trabalho.

Admite uma recompactação ou compactação tardia (revibração), pois o betão permanece em estado fresco durante um período mais longo de tempo. Água adicionada em excesso desaparece, vazios existentes e/ou recém-formados são preenchidos, fissuras que foram formadas no betão fresco são, posteriormente, fechadas garantindo um betão com um baixo volume de vazios.

Melhora o transporte e a aplicação/bombagem.

Assegura uma curva do calor de hidratação (curva da temperatura) uniforme, durante a cura do betão, evitando assim fissuras que possam ocorrer devido às tensões térmicas.

Um betão retardado normalmente tem um aumento de resistência final.

O Centrament Retard 350 pode ser utilizado com todos os cimentos standard. Deve ser adicionado durante a mistura.

O tempo de mistura prescrito, tal como os regulamentos relevantes para a produção, colocação e cura para betão, betão pré-esforçado, etc. com a introdução de retardador, devem ser cumpridos.

Devem ser realizados testes prévios.

A dosagem de retardador depende muito do tipo de cimento, das temperaturas do betão e do ambiente, da composição do betão e outros factores. A dosagem necessária é determinada por ensaios prévios nas diferentes condições existentes. Caso existam alterações às condições previamente testadas, devem ser feitos novos ensaios nas condições actuais.

Aconselha-se a leitura de “informação geral para o uso de adjuvantes para betão”.



## Dados técnicos – Centrament Retard 350

Características	Unidades	Valores	Comentários
Densidade	kg/dm <sup>3</sup>	Aprox. 1,16	-
Dosagem recomendada	g	2 - 50	Por kg de cimento
Teor máximo de cloretos	%	< 0,10	Por peso
Teor máximo de álcalis	%	< 4,0	Por peso

## Características do produto Centrament Retard 350

Tipo de adjuvante	Agente retardador
Nome do adjuvante	Centrament Retard 350
Cor	Castanho
Consistência	Líquido
Certificados de conformidade	0754-CPD-02-1065.2 0754-CPD-02-1067.2
Entidade certificadora	MPA; Karlsruhe
Supervisão interna de acordo com	EN ISO 9001 / EN 934-2/6
Código de cor	Vermelho
Fornecimento	Embalagens de 230kg Embalagens de 1000kg

As propriedades especificadas são baseadas em testes laboratoriais e podem variar com as aplicações práticas. Para determinar as especificações técnicas individuais, testes preliminares devem ser efectuados de acordo com as condições de aplicação.

Nota: A informação constante nesta ficha técnica é baseada na nossa experiência e no que se acredita serem as informações mais seguras disponíveis, não devendo ser entendidas como recomendações que infringam outras patentes. Apesar de todos os produtos MC serem submetidos a testes rígidos de qualidade, nenhuma garantia específica pode ser atribuída atendendo a que os resultados não dependem só da qualidade do produto, mas também de outros factores além do nosso controle. Os dados constantes na ficha técnica remetem para a regulamentação existente e que tem que ser garantida durante a aplicação.  
Todas as transacções estarão sujeitas aos nossos termos e condições de venda, entrega e serviço. Estamos à disposição para esclarecimentos relativos a aplicação ou rendimento dos produtos, ressaltando que as recomendações verbais diferentes das instruções contidas aqui, não são válidas sem a confirmação por escrito da MC-Bauchemie. As normas actualmente em vigor deverão ser respeitadas e cumpridas em todas as situações.

Edição 07/2007. Esta ficha técnica substitui a versão anterior; edições antigas não são válidas. Uma nova ficha técnica pode ser impressa em substituição a esta edição e esta deixa de ser válida.

**Anexo III**

**ANÁLISES QUÍMICAS DO AGREGADO RECICLADO**



CENIMAT

### Quantification of sample **AMOSTRA RCD**

<b>R.M.S.:</b>	0.000
<b>Sum before normalization:</b>	83.4 %
<b>Normalised to:</b>	100.0 %
<b>Sample type:</b>	Solid
<b>Correction applied for medium:</b>	Yes
<b>Correction applied for film:</b>	1
<b>Used Compound list:</b>	OXIDES
<b>Results database:</b>	iq+ 37mm he
<b>Results database in:</b>	c:\programas\panalytical\superq\userdata

	<b>Compound Name</b>	<b>Conc. (%)</b>
1	Na2O	0.3
2	MgO	0.5
3	Al2O3	8.
4	SiO2	31.
5	SO3	14.
6	Cl	0.03
7	K2O	2.
8	CaO	39.
9	TiO2	0.9
10	MnO	0.06
11	Fe2O3	5.
12	CuO	0.04
13	ZnO	0.04
14	Rb2O	0.03
15	SrO	0.03
16	ZrO2	0.01
17	PbO	0.06

CENIMAT

**Quantification of sample argamassa RCD CIMENTO AMOSTRA (R')**

<b>R.M.S.:</b>	0.000
<b>Sum before normalization:</b>	78.3 %
<b>Normalised to:</b>	100.0 %
<b>Sample type:</b>	Solid
<b>Correction applied for medium:</b>	Yes
<b>Correction applied for film:</b>	1
<b>Used Compound list:</b>	OXIDES
<b>Results database:</b>	iq+ 37mm he
<b>Results database in:</b>	c:\programas\panalytical\superq\userdata

	<b>Compound Name</b>	<b>Conc. (%)</b>
1	Na2O	0.1
2	MgO	0.4
3	Al2O3	5.
4	SiO2	21.
5	SO3	7.
6	Cl	0.07
7	K2O	1.
8	CaO	59.
9	TiO2	0.7
10	MnO	0.07
11	Fe2O3	5.
12	CuO	0.05
13	ZnO	0.2
14	Rb2O	0.02
15	SrO	0.03
16	ZrO2	0.01
17	PbO	0.07

CENIMAT

## Quantification of sample **argamassa RCD CIMENTO (R)**

<b>R.M.S.:</b>	0.000
<b>Sum before normalization:</b>	78.2 %
<b>Normalised to:</b>	100.0 %
<b>Sample type:</b>	Solid
<b>Correction applied for medium:</b>	Yes
<b>Correction applied for film:</b>	1
<b>Used Compound list:</b>	OXIDES
<b>Results database:</b>	iq+ 37mm he
<b>Results database in:</b>	c:\programas\panalytical\superq\userdata

	<b>Compound Name</b>	<b>Conc. (%)</b>
1	Na2O	0.3
2	MgO	0.4
3	Al2O3	5.
4	SiO2	22.
5	SO3	7.
6	Cl	0.06
7	K2O	1.
8	CaO	57.
9	TiO2	0.7
10	MnO	0.07
11	Fe2O3	6.
12	CuO	0.06
13	ZnO	0.06
14	Rb2O	0.03
15	SrO	0.04
16	ZrO2	0.02
17	PbO	0.08





**Anexo IV**

**CERTIFICADO DE CONFORMIDADE DA AREIA NORMALIZADA**



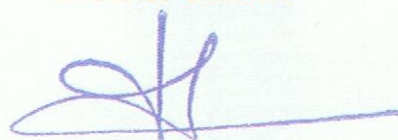
**CERTIFICATION DE CONFORMITE A LA NORME EUROPEENNE**  
**EN 196-1 "SABLE NORMALISE CEN"**

Au vu des résultats d'essais effectués par le LEMVP en janvier 2012, AFNOR Certification certifie que le "sable normalisé" livré par la **Société Nouvelle du Littoral**, Leucate (Aude), a été contrôlé conformément à la procédure définie par la norme européenne EN 196-1 et qu'il peut être commercialisé sous la référence :

**Sable normalisé CEN**  
**Certification AFNOR Certification, contrôle Ville de Paris.**

La Plaine Saint Denis, le 9 février 2012

Directrice Générale



Florence MÉAUX



OB/002/DIV/SABLE NORMALISE CEN  
09/02/2012

11 rue Francis de Pressensé - 93571 La Plaine Saint-Denis Cedex - France - T. +33 (0)1 41 62 80 00 - F. +33 (0)1 49 17 90 00  
SAS au capital de 18 187 000 € - 479 076 002 RCS Bobigny - Ref. 006

[www.afnor.org](http://www.afnor.org)



**Anexo V**

**FICHA TÉCNICA DO AGREGADO RECICLADO**



Produto: Agregado inerte reciclado 0/12

Tipo: Agregado fragmentado de RCD

Utilização: NP EN 13242:2002+A1:2010

Origem: Parque Ecológico Industrial

**CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO**
**Distribuição granulométrica <sup>1)</sup>**

Peneiro (mm)	Valores típicos (%)	Limites Mínimos (%)	Limites Máximos (%)
80	100		
63	100		
40	100		
31,5	100		
20	100		
16	100	100	100
14	100		
12,5	98	93	100
10	95		
8	90		
6,3	85	65	100
4	76		
2	66		
1	53		
0,5	38		
0,25	24		
0,125	18		
0,063	15,4	11,4	19,0

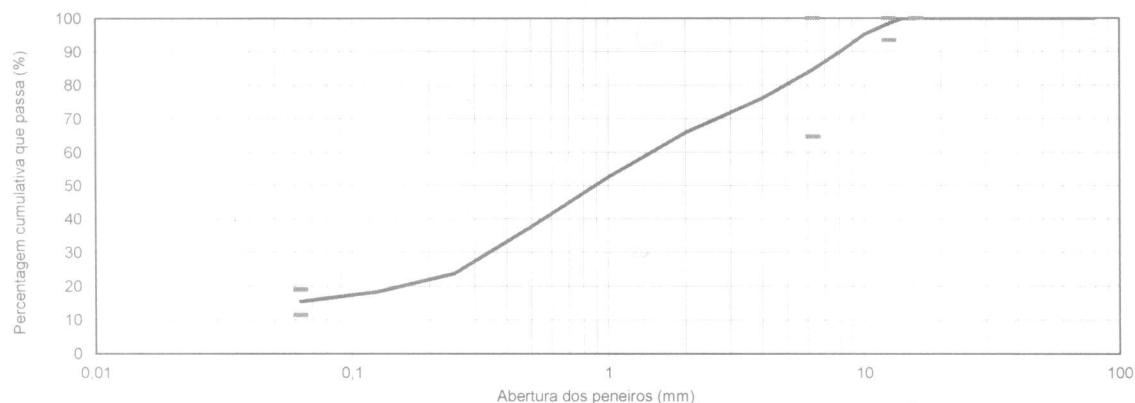
<sup>1)</sup> Valores em percentagem de passados

**Controlo da produção**

Parâmetro	Típico	Mínimo	Máximo
MF	3,40	2,90	3,90
CF	5,05	4,55	5,55

**Outras características**

Característica	NP EN 13242:2002 +A1:2010
Dimensão nominal (d/D)	0/12,5
Granulometria	G <sub>A</sub> 85-GT <sub>A</sub> 20
Teor de finos	f <sub>19</sub>
Qual. dos finos (MB, frac. 0/2mm)	2,8 g/kg
Qualidade dos finos (EA)	63%
Índice Forma agr. Grosso	SI <sub>20</sub>
Material impermeável (M <sub>ps</sub> )	2,47 a 2,62 Mg/m <sup>3</sup>
Partículas secas em estufa (M <sub>prd</sub> )	2,05 a 2,31 Mg/m <sup>3</sup>
Partículas saturadas (M <sub>psst</sub> )	2,23 a 2,42 Mg/m <sup>3</sup>
Absorção de água	5,3 a 8,8%
CI constituint agreg reciclados grossos	Rc <sub>50</sub> ; Rcug <sub>70</sub> ; Rb <sub>30</sub> ; Ra <sub>1</sub> ; Rg <sub>2</sub> ; X <sub>1</sub> ; FL <sub>10</sub>
Teor Sulfatos solúveis em ácido	AS <sub>2,3</sub>
Teor de enxofre total	S <sub>1</sub>
Teor Sulfatos solúveis em água	SS <sub>0,7</sub>
Teor Humus	Isento
Substâncias Perigosas	Isento

**Análise Granulométrica**


Data: 09 / 01 / 2013

O Responsável:



